

Walter Lükenga

Die Zyklonalität im Ostseeraum

Ein Beitrag zur dynamischen Klimageographie
Nordeuropas

1971

1972

GEOGRAPHIE

DIE ZYKLONALITÄT IM OSTSEERAUM

EIN BEITRAG ZUR DYNAMISCHEN KLIMAGEOGRAPHIE NORDEUROPAS

Inaugural - Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der
P h i l o s o p h i s c h e n F a k u l t ä t
der
Westfälischen Wilhelms - Universität
zu
Münster (Westf.)

vorgelegt von
Walter Lükenga
aus
Oldenburg (Oldbg.)

1970



Tag der mündlichen Prüfung: 13. Januar 1971

Dekan: Prof. Dr. H. Lausberg, geschäftsführender Prodekan

Referent: Prof. Dr. Dr. h.c. J. Blüthgen

Korreferent: Prof. Dr. H. Hambloch

Vorwort

Die vorliegende Arbeit wurde von meinem verehrten Lehrer, Herrn Prof. Dr. Dr. h.c. J. BLÜTHGEN angeregt, der mich auch mit den Problemen und Fragestellungen der Klimageographie vertraut gemacht hatte. Für die Ratschläge und Hirweise, mit denen er die Fertigstellung dieser Arbeit unterstützte, sei ihm an dieser Stelle mein besonderer Dank ausgesprochen.

Weiterhin möchte ich es nicht versäumen, Herrn Regierungsdirektor Dr. KLUG dafür zu danken daß ich die Gelegenheit erhielt, am Wetteramt in Essen zu hospitieren. Durch die Gespräche mit den dort tätigen Klimatologen und Meteorologen konnte ich meine klimatologischen Kenntnisse vertiefen und Anregungen zur Ausführung der vorliegenden Arbeit sammeln. Auch diesen Herren gilt mein herzlicher Dank.

Schließlich möchte ich an dieser Stelle auch meiner Frau für die während der Abfassung der Dissertation gezeigte Nachsicht und für ihr Verständnis sehr herzlich danken. Ihre nimmermüde Unterstützung trug entscheidend zur Überwindung mancher Schwierigkeiten bei.

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Vorwort	iii
Inhaltsverzeichnis	iv
Verzeichnis der Abbildungen	vi
Verzeichnis der Tabellen	viii
Verzeichnis der Diagramme	ix
 I. Einleitung	
A. Die Wetterkarte als Arbeitsmittel der synoptischen Klimageographie	1
B. Die Definition der Zyklonalität	3
C. Die Zyklonalität in historischer Sicht	6
 II. Analytischer Teil	
A. Die Arbeitsgrundlagen	
1. Das Ausgangs- und Arbeitsmaterial	10
2. Die Jahreszeiteinteilung	12
B. Die Tiefdruckgebiete	
1. Die Einteilung der Tiefdruckgebiete	13
2. Die Wetterkartenbeispiele der Tiefdruck- gebiete	26
C. Die quasistationären Bodenzykklonen	42
1. Thermische Tiefs	42
2. Leetiefs	52
3. Resonanztiefs	55
4. Frontaltiefs	57
D. Die wandernden Bodenzykklonen	63
1. Die Merkmale der Bahngruppen	
a. Die Intensität der Zyklonen	65
b. Die Durchschnittsgeschwindigkeit der Zyklonen	68
2. Die gestreckten Bahnen	69
a. Bahngruppe I	76
b. Bahngruppe II	83
c. Bahngruppe III	88
d. Bahngruppe IV	92
e. Bahngruppe V	98
f. Bahngruppe VI	104
g. Bahngruppe VII	109

	Seite
h. Bahngruppe VIII	117
i. Bahngruppe IX	126
k. Bahngruppe X	130
3. Die gekrümmten Bahnen	137
a. Bahngruppe XI	139
b. Bahngruppe XII	142
4. Die retrograden Bahnen	147
a. zyklonal gekrümmt	
aa.) Bahngruppe XIII	147
ab.) Bahngruppe XIV	150
ac.) Bahngruppe XV	154
b. antizyklonal gekrümmt	
ba.) Bahngruppe XVI	157
bb.) Bahngruppe XVII	160
5. Die aberranten Bahnen	
Bahngruppe XVIII	163
6. Die Neubildungsgebiete	179
7. Die Auffüllungsgebiete	188
8. Die Vertiefungs- und Verflachungsgebiete	195
E. Die Kaltlufttropfen	205
1. Die KSO- Bahngruppe	206
2. Die KO- Bahngruppe	209
3. Die KN- Bahngruppe	215
4. Die KNW- Bahngruppe	218
5. Die KW- Bahngruppe	221
6. Die KSW- Bahngruppe	225
7. Die aberranten Kaltlufttropfenbahnen (KA)	226
III. Synthetischer Teil	
Der Jahresgang der Zyklonalität	232
IV. Schluß	243
V. Literaturverzeichnis	244

Verzeichnis der Abbildungen

Lfd. Nr.	Abbildung	Seite
1	Muster eines Arbeitsblattes	11
2	Thermisches Tief im Winter	26
3	Thermisches Tief im Sommer	27
4	Leetief	28
5	Resonanztief	29
6	Kaltfrontwelle	30
7	Warmsektorzyklone	31
8	Okklusionstief	32
9	Kaltfronttief	33
10	Staffeltief	34
11	Warmfrontwelle	35
12	Zentralzyklone	36
13	Kaltes Tief	37
14	Deszendierende Zyklone	38
15	Schwacher Kaltlufttropfen bei flacher Höhendruckverteilung	39
16	Schwacher Kaltlufttropfen in einem symmetrischen Höhentrog	40
17	Intensiver Kaltlufttropfen	41
18	Thermische Tiefs Frühling/Sommer	44
19	Thermische Tiefs Herbst/ Winter	46
20	Wetterkarte vom 10. Dezember 1957	48
21	" " 12. " "	48
22	" " 13. " "	48
23	" " 14. " "	48
24	Mittlere Druckverteilung im Ostseeraum	50
25	Leetiefs Frühling/Sommer	54
26	Resonanztiefs	56
27	Frontaltiefs Frühling/Sommer	59
28	Frontaltiefs Herbst/ Winter	60
29	Richtungsmäßige Verteilung der gestreckten Zugbahnen nach ihrer Herkunft	71
30	Richtungsmäßige Verteilung der gestreckten Bahngruppen	75
31/32	Bahngruppe I	78
33/34	Niederschlagsverteilung in Nordschweden	82
35/36	Bahngruppe II	86
37/38	Bahngruppe III	90
39/40	Bahngruppe IV Frühling/Sommer	94
41/42	Bahngruppe IV Herbst/Winter	96
43/44	Bahngruppe V Frühling/Sommer	99
45/46	Bahngruppe V Herbst/Winter	102
47/48	Bahngruppe VI	105
49/50	Bahngruppe VII Frühling/Sommer	111
51/52	Bahngruppe VII Herbst/Winter	113
53	Querschnitt durch Nordeuropa bei Westwind- überwehung	115
54	Querschnitt durch eine Kaltfront beim Überqueren eines Gebirges	119
55/56	Bahngruppe VIII Frühling/Sommer	120
57	Querschnitt eines Gebirges und dahinter lagernder Warmluft	121
58/59	Bahngruppe VIII Herbst/Winter	122
60	Querschnitt durch eine Warmfront beim Überqueren eines Gebirges	124

Lfd. Nr.	Abbildung	Seite
61/62	Bahngruppe IX	128
63/64	Bahngruppe X	132
65	Tiefdruckgebiete aus östlicher Richtung	136
66/67	Bahngruppe XI	138
68/69	Bahngruppe XII	143
70/71	Bahngruppe XIII	149
72/73	Bahngruppe XIV	152
74/75	Bahngruppe XV	155
76/77	Bahngruppe XVI	158
78/79	Bahngruppe XVII	161
80	Bahngruppe XVIII	166
81	"	167
82	"	168
83	"	169
84	"	170
85	"	172
86	"	173
87	"	174
88	"	175
89	"	177
90	"	178
91	Verteilung der Neubildungen im Frühjahr	182
92	Verteilung der Neubildungen im Sommer	183
93	Verteilung der Neubildungen im Herbst	185
94	Verteilung der Neubildungen im Winter	186
95	Verteilung der Auffüllungsorte (Frühjahr)	191
96	Verteilung der Auffüllungsorte (Sommer)	192
97	Verteilung der Auffüllungsorte (Herbst)	193
98	Verteilung der Auffüllungsorte (Winter)	194
99/100	Positive und negative Druckänderungen im	
	Frühjahr	197
101/102	Sommer	200
103/104	Herbst	202
105/106	Winter	204
107/108	KSO -Bahngruppe	208
109/110	KO -Bahngruppe	210
111	Schnitt durch den Kaltlufttropfen am 18. November 1959 um 00 Uhr GCT	213
112	Verteilung der Niederschlagsmengen in mm am 17. November 1959 zwischen 06-18 Uhr GCT	214
113/114	KN -Bahngruppe	217
115/116	KNW -Bahngruppe	220
117/118	KW -Bahngruppe	224
119/120	KSW -Bahngruppe	227
121/122	KA -Bahngruppe Frühling/Sommer	230
123/124	KA -Bahngruppe Herbst/Winter	231

Verzeichnis der Tabellen

Lfd. Nr.	Tabelle	Seite
1	Verteilung der Kaltlufttropfen nach Zahl der geschlossenen Isohypsen	22
2	Gliederung und Zahl der aufgetretenen Tiefdrucktypen	25
3	Jahreszeitliche Verteilung der Thermischen Tiefs	42
4	Jahreszeitliche Verteilung der Leetiefs	53
5	Jahreszeitliche Verteilung der Resonanz-tiefs	55
6	Jahreszeitliche Verteilung der Frontaltiefs	58
7	Durchschnittsgeschwindigkeit der Zyklonen in verschiedenen Erdräumen	68
8	Bahngruppe I	79
9	Bahngruppe II	83
10	Bahngruppe III	88
11	Bahngruppe IV	92
12	Bahngruppe V	98
13	Bahngruppe VI	104
14	Bahngruppe VII	109
15	Bahngruppe VIII	118
16	Bahngruppe IX	127
17	Bahngruppe X	131
18	Bahngruppe XI	139
19	Bahngruppe XII	142
20	Bahngruppe XIII	148
21	Bahngruppe XIV	150
22	Bahngruppe XV	156
23	Bahngruppe XVI	159
24	Bahngruppe XVII	162
25	Bahngruppe XVIII	164
26	Verteilung der Neubildungen	180
27	Verteilung der Auffüllungen	189
28	Häufigkeitsverteilungen der interdiurnen Druckänderungen im Frühling	196
29	Sommer	198
30	Herbst	199
31	Winter	203
32	KSO-Bahngruppe	207
33	KO -Bahngruppe	211
34	KN -Bahngruppe	215
35	KNW-Bahngruppe	221
36	KW -Bahngruppe	222
37	KSW-Bahngruppe	225
38	Aberrante Kaltlufttropfenbahnen (KA)	228

Verzeichnis der Diagramme

Lfd. Nr.	Diagramm	Seite
1	Jahresgang der Thermischen Tiefs	43
2	Windgeschwindigkeit und Wärmeabgabe bei Ulkokalla zwischen dem 8. und 14. Dez. 57	49
3	Jahresgang der Leetiefs	53
4	Jahresgang der Resonanztiefs	55
5	Jahresgang der Frontaltiefs	61
6	Verteilung der Intensitätsfaktoren aller bahnbildenden Tiefdruckgebiete	67
7	Verteilung der IF Bahngruppe I	77
8	Jahresgang der Bahngruppe I	79
9	Jahresgang der Bahngruppe II	84
10	Verteilung der IF Bahngruppe II	87
11	Jahresgang der Bahngruppe III	88
12	Verteilung der IF Bahngruppe III	91
13	Jahresgang der Bahngruppe IV	93
14	Verteilung der IF Bahngruppe IV	97
15	Jahresgang der Bahngruppe V	100
16	Verteilung der IF Bahngruppe V	103
17	Verteilung der IF Bahngruppe VI	106
18	Jahresgang der Bahngruppe VI	107
19	Jahresgang der Bahngruppe VII	114
20	Verteilung der IF Bahngruppe VII	116
21	Jahresgang der Bahngruppe VIII	123
22	Verteilung der IF Bahngruppe VIII	125
23	Jahresgang der Bahngruppe IX	127
24	Verteilung der IF Bahngruppe IX	129
25	Jahresgang der Bahngruppe X	131
26	Verteilung der IF Bahngruppe X	135
27	Jahresgang der Bahngruppe XI	140
28	Verteilung der IF Bahngruppe XI	141
29	Jahresgang der Bahngruppe XII	145
30	Verteilung der IF Bahngruppe XII	146
31	Jahresgang der Bahngruppe XIII	147
32	Jahresgang der Bahngruppe XIV	153
33	Verteilung der IF Bahngruppe XIV	154
34	Jahresgang der Bahngruppe XV	156
35	Jahresgang der Bahngruppe XVI	159
36	Jahresgang der Bahngruppe XVII	163
37	Jahresgang der Bahngruppe XVIII	165
38	Jahresgang der KSO-Bahngruppe	207
39	Jahresgang der KO -Bahngruppe	212
40	Jahresgang der KN -Bahngruppe	215
41	Jahresgang der KNW-Bahngruppe	219
42	Jahresgang der KW -Bahngruppe	222
43	Jahresgang der KSW-Bahngruppe	225
44	Jahresgang der KA -Bahngruppe	228

I. Einleitung

A. Die Wetterkarte als Arbeitsmittel der synoptischen Klimageographie

Die Wissenschaft von der Erforschung des Klimas, die seit der Mitte des 19. Jahrhunderts als spezifisches Teilgebiet der Geographie angesehen worden war, hat sich inzwischen durch ständige Ausweitung ihres Stoffgebietes als "Klimatologie" verselbstständigt. Diese Entwicklung wurde gefördert durch den schon während des zweiten Weltkrieges erfolgenden Vorstoß der Meteorologie in höhere und höchste Schichten der Atmosphäre, deren Ergebnisse sich auch die Klimatologie zu eigen machte. Dadurch verlor der Zusammenhang mit dem speziell den Geographen interessierenden erdoberflächengebundenen atmosphärischen Geschehen immer mehr an Deutlichkeit, so daß es notwendig wurde, auch den spezifischen Teilbeitrag, den neben anderen Disziplinen auch die Geographie zu diesem Forschungszweig zu leisten vermag, neu zu definieren. Auf diesen speziell geographischen Anteil ist zuerst von H. LAUTENSACH (1940) hingewiesen worden, ohne daß er damals schon die Namenskonsequenz gezogen hätte. Erst J. BLÜTHGEN führte den in Analogie zu geläufigen Benennungen wie z.B. "Wirtschaftsgeographie" gebildeten Begriff "Klimageographie" ein (1942, S. 22), der dann später (1964) vom gleichen Verfasser wieder aufgenommen und definiert wurde. In anderem Zusammenhang und völlig unabhängig von J. BLÜTHGEN schlug gleichzeitig auch K.H. PAFFEN (1964, S. 51) vor, diesen Begriff einzuführen.

Als Teil der allgemeinen Geographie besteht das Ziel der Klimageographie nicht in der Erforschung der erdrachen atmosphärischen Gegebenheiten an sich, sondern sie bedient sich dieser nur als Hilfsmittel zur Erklärung des aus charakteristischen Witterungszuständen zusammengesetzten Klimas eines bestimmten Erdraumes. Diese streng geographische Bezogenheit kommt in der neuen Klimadefinition zum Ausdruck, die J. BLÜTHGEN (1966, S. 4) seiner "Allgemeinen Klimageographie" voranstellt: "Das geographische Klima ist die für einen Ort, eine Landschaft oder einen größeren Raum typische Zusammenfassung der erdnahen und die Erdoberfläche beeinflussenden atmosphärischen Zustände und Witterungsvorgänge während eines längeren Zeitraumes in charakteristischer Verteilung der häufigsten, mittleren und extremen Werte."

Dem Hauptziel, eine "die Erde umspannende und die Wirkung auf die Erdoberfläche erklärende, dabei genetisch fundierte Klimaklassifikation" (ebenda), kann man sich dabei auf zwei verschiedenen Wegen nähern. Einmal ist es die separative Klimageographie, die sich vornehmlich der Untersuchung der Werte einzelner Klimaelemente widmet, die bei kritischer Anwendung natürlich auch ihren wissenschaftlichen Beitrag zur Erklärung kausaler Zusammenhänge liefert. Diese ausschließlich analytisch-statische Betrachtungsweise kann bei Verwendung von Mittelwert-Karten allerdings auch zu völligen Fehlschlüssen über die atmosphärischen Zustände führen, wie sich in der Vergangenheit gezeigt hat. Der Darstellung der Witterungsabläufe wird sie in jedem Fall nicht gerecht.

Der zweite Weg zum Ziel führt über die synoptische Klimageographie (vgl. J.BLÜTHGEN 1965), die sich im Gegensatz zu vorgenannter Arbeitsrichtung mit komplexen Größen wie Luftmassen, Druckgebilden oder Großwetterlagen beschäftigt. Ihr Arbeits- und Forschungsmittel ist die Wetterkarte, in der die durch ein Netz synoptischer Stationen gewonnenen punkthaften Werte bereits geographisch aufbereitet sind. Obwohl diese Karten schon seit der Erfindung der drahtlosen Telegraphie vor mehr als hundert Jahren vorliegen, ist ihre Bedeutung für die Erforschung der atmosphärischen Strukturelemente lange Zeit nicht genügend berücksichtigt worden. Dies ist um so bemerkenswerter, als schon J.v.HANN (1883, S. 1) den Begriff des Klimas nicht nur als den "mittleren Zustand der Atmosphäre", sondern auch als die "Gesamtheit der Witterungen" definierte. Die Vernachlässigung der Wetterkarte als klimatologisches Forschungsmittel bis in die dreißiger Jahre unseres Jahrhunderts lag dabei sicherlich nur zum Teil darin begründet, daß der Blick der Klimaforschung einseitig auf die aus Elementarwerten gewonnenen anschaulichen Mittelwertkarten fixiert war. Die "praktischen Schwierigkeiten der sehr zeitraubenden und methodisch noch nicht klar abgesicherten Auswertung der Wetterkarten" (W.ERIKSEN 1970, S. 139), auf die schon A.SCHEDLER (1923, S. 1) hinwies und die heute noch bestehen, wirkten dieser Arbeitsweise wahrscheinlich schon damals entgegen. Auch die "psychologischen Hemmnisse, die in der täglichen Erfahrung der relativen Unsicherheit synoptischer Analysen und Vorhersagen wurzeln und die unbewußt auf die Wetterkarte übertragen werden, obwohl diese einen auf exakten Messungen beruhenden Augenblickszustand der Atmosphäre zur

Anschauung bringt"(W. ERIKSEN, ebenda), dürfte mit dazu beigetragen haben, daß die Wetterkarte erst in neuerer Zeit als Forschungsmittel größere Beachtung fand. Wenn auch schon aus dem vorigen Jahrhundert einzelne Arbeiten vorliegen (von J.v. BEBBER ab 1880 und von W. KÖPPEN ab 1882), so hat sich doch die Zahl der klimageographischen Untersuchungen, denen Wetterkarten als Arbeitsmittel zu Grunde liegen, erst ab 1930 bedeutend vergrößert. Heute allerdings gibt es eine Vielzahl von Publikationen, die Aussagen nicht nur über die Zugbahnen von Druckgebilden, sondern auch über die Druckgebilde selbst sowie über Fronten, Luftmassentransporte, Wetterlagen, Zirkulationstypen und Regelfälle gestatten.

B. Die Definition der Zyklonalität

Innerhalb der synoptischen Klimageographie war die Aufmerksamkeit schon früh auf das Auftreten von Tiefdruckgebieten gerichtet. Dies ist einmal darauf zurückzuführen, daß schon in den allerersten synoptischen Karten die Zyklonen als "mehr oder minder rundliche Gebilde tieferen Drucks" (S.P.CHROMOW 194c, S. 303) im barischen Feld stärker hervortraten als die Antizyklonen. Zum anderen geht von den zyklonalen Störungen der Atmosphäre, die auf Grund der Regelmäßigkeit und Häufigkeit ihres Auftretens für die gemäßigten Breiten als charakteristische Ausdrucksform der allgemeinen Zirkulation anzusehen sind, die größte Wetterwirksamkeit aus, so daß der Untersuchung ihrer Entwicklung neben dem theoretischen Erkenntniswert auch weitreichende wirtschaftliche Bedeutung zukommt. Daß schon J.v. BEBBER die Wichtigkeit dieser atmosphärischen Störungen voll bewußt war, kommt in seiner 1880 veröffentlichten Arbeit deutlich zum Ausdruck: "Die Kenntniß der Häufigkeit der Minima, ihrer Bewegungsrichtungen, ihrer Geschwindigkeit, ihrer Änderungen, ihrer Einflüsse auf Wind und Wetter und endlich ihrer Abhängigkeitsverhältnisse von den die Wetterlage bestimmenden meteorologischen Elementen, und zwar mit Berücksichtigung der jährlichen Periode und der geographischen Vertheilung, welche wir alle mit dem gemeinsamen Namen 'Klimatologie der atmosphärischen Störungen' zusammenfassen, eröffnet jedenfalls einige tiefere Einblicke in den Mechanismus der großen atmosphärischen Störungen und gibt der Wetterprognose mehr und mehr eine breitere und festere

Basis, der sie ja jedenfalls noch sehr bedarf" (S. 29). Obwohl in diesem Satz nicht auf die dreidimensionale Struktur der Zyklonen eingegangen wird, die damals infolge des Mangels an aerologischen Meßergebnissen auch noch nicht erkannt werden konnte und die erst durch die von J. BJERKNES gegründete "Norwegerschule" in den zwanziger Jahren unseres Jahrhunderts weitgehend erforscht wurde, umfaßt er doch nahezu alle Gesichtspunkte, die auch heute noch bei der Lösung des Problems der "Zyklonalität" berücksichtigt werden müssen. Dieser erst in neuerer Zeit geprägte Begriff wird in der Literatur in unterschiedlicher Weise gebraucht. Während er bei B.BARG (1959, S.89) und bei J.BRADKA (1966, S. 607) mehr das in statistischen Sammelkarten erfaßbare Auftreten von Zyklonen bezeichnet, verstehen ihn J.BLÜTHGEN (1966, S. 231 und 570) und G.BAHRENBURG (1968, S. 13) mehr unter dem Aspekt der Häufigkeit und der Zugbahnen von Tiefdruckgebieten. Allgemein scheint sich dieser Begriff aber noch nicht durchgesetzt zu haben, denn in dem neu erscheinenden "Lexikon der Geographie" von WESTERMANN (Braunschweig) ist das Stichwort "Zyklonalität" laut Auskunft der Redaktion nicht vorgesehen. Es erscheint daher notwendig, den Ausführungen dieser Arbeit eine Definition dieses Begriffes voranzustellen.

Das eigentliche Objekt der Klimageographie, nämlich das Klima eines bestimmten Raumes, setzt sich zusammen aus antizyklonalen und zyklonalen Witterungen. Letztere wiederum stehen in unmittelbarem Zusammenhang mit Tiefdruckgebieten, die in dem Raum auftreten oder ihn durchqueren, so daß eine komplexe Untersuchung derselben zu einer Erklärung der zyklonalen Beeinflussung auf der Basis klassifizierter atmosphärischer Zustände führt. Der Begriff der "Zyklonalität" soll deshalb hier umfassen das Auftreten von Tiefdruckgebieten verschiedener dreidimensionaler Struktur im Boden- und Höhendruckfeld, ihre Bewegungsrichtung, ihre Verlagerungsgeschwindigkeit, ihre Intensität, ihre Entstehungs-, Vertiefungs- und Auffüllungsgebiete und ihre Bedeutung für das Witterungsgeschehen über einem bestimmten Erdraum in jahreszeitlichem Wechsel.

Der "bestimmte Erdraum", dessen Zyklonalität in der vorliegenden Arbeit untersucht werden soll, ist das Ostseegebiet, das als räumliche Einheit zum ersten Mal von G. BRAUN (1912) zusammenfassend beschrieben worden ist. Es umfaßt einzelne Teile oder

das gesamte Gebiet der an die Ostsee angrenzenden Staaten Dänemark, Schweden, Finnland, die U.d.S.S.R., Polen und Deutschland. Zur genaueren Festlegung der Grenze bietet sich im Westen der Kamm des skandinavischen Gebirges an, der sowohl hydrologisch als auch klimatisch Schweden von Norwegen trennt. Auch im Norden kann die Wasserscheide, die in etwa dem Verlauf des Saariseikä entspricht, als Grenze dienen, so daß der nördlichste Teil Finnlands mit dem Inarisee ausgeschlossen bleibt. Im Osten dagegen läßt sich eine markante morphographische Grenze nicht festlegen; die Trennungslinie folgt deshalb der ehemaligen finnischen Ostgrenze entlang dem 32. Meridian östlicher Länge, durchquert in Nord-Süd-Richtung den Ladoga-See und stößt, in weitem Bogen das Gebiet um Leningrad und die ehemaligen baltischen Randstaaten umschließend, auf die großen Landrücken der letzten Vereisung in Norddeutschland. Dieser Leitlinie folgend zieht sich dann die Grenze westwärts bis nach Mecklenburg. Von dort verläuft sie nach Nordwesten, bis sie die deutsch-dänische Grenze schreidet. Da das Skagerrak, das eigentlich nicht mehr zum Ostseebereich gehört, mit in den Untersuchungsraum aufgenommen werden sollte, weil von ihm wesentliche Impulse für die zyklonale Beeinflussung des Ostseeraumes ausgehen, zieht sich die Grenzlinie durch Jütland fast genau nach Norden und stößt in Südnorwegen wieder auf die Gebirgsschwelle. - Dieses so begrenzte Gebiet hat den 20. Grad östlicher Länge als Mittelmeridian und erstreckt sich in Süd-Nord-Richtung vom 53. bis zum 69. Breitenkreis nördlicher Breite.

Diese so vorgenommene Begriffsbestimmung der Zyklonalität des Ostseeraumes, mit der auch gleichzeitig der Aufbau der vorliegenden Arbeit in groben Zügen umrissen ist, berücksichtigt sowohl die atmosphärischen Zustände als auch die von ihnen abhängigen Witterungsvorgänge. Nun ist aber eine gleich intensive Bearbeitung beider Bereiche für einen Einzelnen aus arbeitstechnischen Gründen nur schwer möglich so daß ein Arbeitsschwerpunkt gebildet werden muß. Dieser liegt, da die Witterungsvorgänge erst Sekundärererscheinungen sind, in dieser Arbeit auf den atmosphärischen Zuständen über dem Untersuchungsraum. Damit ist nicht gesagt, daß die Witterungserscheinungen weniger wichtig wären; ihnen kommt im Gegenteil im Rahmen einer regionalen Klimageographie eine überragende Bedeutung zu, da durch sie erst die Besonderheiten eines Raumes charakterisiert werden. Um aber erst

einmal die Grundlagen und Methoden zu schaffen, auf denen eine spätere regionalklimageographische Untersuchung aufbauen kann, wurde in der vorliegenden Arbeit eine Beschränkung auf den oben genannten Schwerpunkt vorgenommen, so daß auf die die Tiefdruckgebiete begleitenden Witterungsvorgänge nur in verkürzter Form eingegangen wird.

C. Die Zyklonalität in historischer Sicht

Obwohl eine größere Zahl von Veröffentlichungen vorliegt, die die Behandlung von Tiefdruckgebieten zum Gegenstand haben, ist die oben definierte Zyklonalität in ihrer gesamten Komplexität bisher noch nicht zusammenhängend untersucht worden. Da den bisher erschienenen Arbeiten immer eine bestimmte, oft auf die praktische Nutzanwendung gerichtete Zielsetzung zu Grunde liegt, behandeln die Verfasser immer nur Teilaspekte der Zyklonalität.

Die erste Untersuchung, die speziell das Ostseegebiet unter klimageographischen Aspekten behandelt, wurde 1934 von E.NEHLs veröffentlicht. Ihr Ziel, das Klima eines Gebietes unter dynamischer Gesichtspunkten zu erfassen, sollte dadurch erreicht werden, daß "die Zusammenhänge zwischen dem jährlichen Gang der Temperaturen, der Niederschlags- und Bewölkungsverhältnisse und den Formen der Luftdruckgebilde, sowie ihre Aufeinanderfolge während des Jahres systematisch untersucht werden" (S. 12). Dazu wurden die im Laufe von 10 Jahren auftretenden Formen der Luftdruckverteilung zu 20 barometrischen Wetterlagetypen zusammengefaßt, mit meteorologischen Daten versehen, auf ihre Häufigkeit während des Jahres hin untersucht und daraus der Witterungscharakter für einzelne Jahresabschnitte abgeleitet. Obwohl die Hälfte der wetterlagetypen Tiefdruckgebiete umfassen, lassen sich für die Zyklonalität des Ostseeraumes nur Schlüsse allgemeiner Art ziehen. Wohl geht aus der Untersuchung hervor, wann und wo sich Tiefdruckgebiete häufen, der tatsächliche Ablauf der atmosphärischen Vorgänge wird bei dieser mehr statistisch arbeitenden Methode aber nicht erfaßt.

Einen ganz anderen Weg schlug S.EVJEN (1953) ein, um die Zyklonalität Norwegens zu erforschen. Er teilte die Tiefdruckgebiete nach ihrem Kerndruck in drei Klassen ein (weniger als 980 mb, zwischen 980 und 1000 mb und über 1000 mb) und untersuchte, wie oft von ihnen zwei über Norwegen festgelegte Grenz-

linien überschritten wurden. Neben der absoluten Häufigkeit ihres Auftretens kommt S.EVJEN auch zu Ergebnissen über die Herkunftsrichtung der Zyklonen sowie über die Häufigkeit von Vertiefungen und Auffüllungen. Diese die Zyklonalität des westlichen Skandinavien relativ umfassend untersuchende Arbeit leidet allerdings unter dem Mangel einer die dreidimensionale Struktur der Tiefdruckgebiete nicht berücksichtigenden Typisierung. Auch kann man die tatsächlichen Zugbahnen der Zyklonen nur indirekt erschließen.

Aus der Praxis und mit Hilfe der in den Wetterdiensten verwendeten numerisch-graphischen Vorhersagemethode lieferte B. BARG (1959) einen speziellen Beitrag zur Zyklonalität im Bereich der Nord- und Ostsee, indem er die Frage des orographischen Einflusses des südnorwegischen Berglandes auf zyklonenetische Vorgänge und allgemein auf das Bodendruckfeld im Skagerrak untersuchte. Seiner Arbeit lagen folgende Gedanken zu Grunde: "Mit Hilfe der numerisch-graphischen Verfahren sind wir in der Lage, Vorhersagekarten zu konstruieren. Diese Vorhersagekarten können wir mit der tatsächlich eingetretenen Druckverteilung vergleichen. Verwendet man zur Berechnung Modelle, in deren Gleichungen die Orographie bzw. Topographie nicht eingearbeitet wurde, so kann man erwarten, daß die Fehler dieser graphischen Vorhersage in den Gebieten, in denen die Orographie in stärkerem Maße wirksam ist, besonders groß sind" (S. 83). Zur Untersuchung wurden allerdings nur 25 Wetterlagen herangezogen, die hinsichtlich der Möglichkeit einer Randwirbelbildung ganz speziellen Auswahlbedingungen genügen mußten. Für diese speziellen Fälle lassen sich Gebiete verstärkter Zyklonalität über dem Nordatlantik zwischen den Shetlands und dem westlichen Teil von Norwegen und über Nordrußland feststellen, während im Ostseegebiet selbst nur eine schwache Zyklonalität herrscht. B.BARG kommt zu dem Ergebnis, daß "der Orographie Südnorwegens nicht zuviel Bedeutung beizumessen (ist), denn im Mittel wird der orographische Effekt nicht ausreichend sein für eine Zyklonogenese, sondern nur eine Deformation des Druckfeldes hervorrufen" (1959, S. 90). Wie die vorliegenden Ergebnisse zeigen, kann diese Aussage aber nur für die herangezogenen 25 speziellen Fälle eine Gültigkeit beanspruchen.

Als letzte, mehr den südlichen Ostseeraum betreffende klimatologische Untersuchung muß noch die Arbeit von W. WARMT (1941) erwähnt werden, die allerdings nicht von der synoptischen Wetterkarte, sondern den meteorologischen Einzelbeobachtungen ausgeht, auf Grund derer das Klima des Ostseegebietes nach häufigkeitsstatistischen Gesichtspunkten bearbeitet wird.

Neben diesen Arbeiten, die speziell das Ostseegebiet berücksichtigen, gibt es inzwischen eine Fülle von Literatur, die Teilbeiträge zur Zyklonalität größerer Erdräume (Mitteleuropa, Gesamteuropa oder nördliche Hemisphäre) enthalten. Auf die große Zahl von Veröffentlichungen, die, um nur einige zu nennen, von J. v. BEBBER und W. KÖPPEN (ab 1880) über A. SCHEDLER (1924), R. RICHTER (1938), H. SCHOENWÄLDER (1953), H. MAEDE (1954), H. MARKGRAF (1955/56), W. KLEIN (1957), W. U. WEIMANN (1958), W. DAMMANN (1960) bis zu G. BAHRENBURG (1968) reicht, soll hier nicht weiter eingegangen werden, da sich eine kritische Besprechung dieser Literatur zum größten Teil schon bei G. BAHRENBURG (1968) findet. Auf letztere Arbeit muß aber noch kurz Bezug genommen werden, da G. BAHRENBURG einen neuen Weg beschreitet, indem er die bisher benutzte starre Monats- und Jahreszeiteinteilung verläßt und die Zugrichtung als primäres Auswahlkriterium in den Vordergrund stellt. Anders als in den bisher üblichen Bahnkarten wird hier aber auf eine räumliche Mittelung verzichtet und der Verlauf jeder Einzelbahn dargestellt, so daß sich ein mehr oder minder breiter Bahnstreifen ergibt. Zur Festlegung und Abgrenzung dieser Bahnen wurde die dreidimensionale Struktur berücksichtigt, indem nicht nur der Struktur der Fronten, sondern auch der vertikalen Erstreckung der Tiefdruckgebiete Rechnung getragen wurde. Bei räumlich benachbarten Bahnen wurde die Zusammensetzung nach verschiedenen Tiefdrucktypen untersucht; ergaben sich dabei "große" Unterschiede, wurde die Trennung beibehalten. Waren die Unterschiede "gering", wurden beide Bahnstreifen zu einer neuen Bahn vereinigt, deren Ähnlichkeit mit ihren Nachbarbahnen dann wieder neu untersucht wurde. Die Definition der "großen" bzw. "geringen" Unterschiede wurde dabei mit Hilfe des χ^2 -Testes vorgenommen. Auf diese Weise erhielt G. BAHRENBURG für Mitteleuropa 24 Bahntypen, die sich hinsichtlich der Herkunftsrichtung, der vertikalen Struktur, der Geschwindigkeit und der jahreszeitlichen Verteilung der auf ihnen wandernden Tiefdruckgebiete unterscheiden. Allerdings sind diese Bahntypen

nicht alle statistisch genügend gesichert, da sie teilweise zu wenig Fälle enthalten. Da diese Methode der Darstellung der tatsächlich abgelaufenen atmosphärischen Geschehnisse am nächsten kommt, soll sie in der vorliegenden Arbeit mit einigen Abweichungen verwandt werden. Allerdings eignet sie sich nur für die wandernden Bodenzykklonen; bei den Kaltlufttropfen, deren Einzelbahnen wesentlich unregelmäßiger verlaufen, wird dagegen nur grob nach der Herkunftsrichtung unterschieden.

Legt man bei der Untersuchung der Zyklonalität den Schwerpunkt nicht so sehr auf die Zyklonen selbst, sondern mehr auf die von ihnen ausgehende zyklonale Beeinflussung eines Raumes, so treten die den Tiefdruckgebieten anhängenden Fronten als Träger des Witterungsgeschehens automatisch stärker in den Vordergrund der Betrachtung. Die Fragestellung, ob "die den Wetterkarten zu entnehmenden Fronten einer gewissen räumlichen und eventuell auch zeitlichen Regelmäßigkeit unterworfen" sind, führte W.ERIKSEN (1970, S. 140) zur Untersuchung der Fronten über Europa. Ausgehend von dem Wetterkartenmaterial der Jahre 1958 bis 1962 zählte er dazu sämtliche auftretenden Fronten, unterschieden nach Kaltfront, Warmfront und Okklusion mit Hilfe eines Quadratgitternetzes monatsweise aus. - Obwohl diese frontologische Arbeitsweise Einblicke in die witterungsmäßige Beeinflussung bestimmter Erdräume gestattet, stellen die Ergebnisse Abstraktionen der tatsächlichen atmosphärischen Vorgänge dar, so daß z.B. nicht ersichtlich ist, welche Zyklonenbahnen an den Häufigkeitsmaxima der Fronten im Bereich der deutschen Nord- und Ostseeküste beteiligt sind. Auch können mit dieser Methode nicht die frontenlosen Boden- und Höhenzyklonen erfasst werden, die unter Umständen einen entscheidenden Anteil an der charakteristischen Witterungsbeeinflussung eines Raumes haben. Vorteilhaft wirkt sich dagegen bei dieser Methode der Umstand aus, daß auch der Einfluß von weiter entfernten, das Untersuchungsgebiet nicht direkt durchquerenden Zyklonen berücksichtigt wird, was besonders für das Ostseegebiet bei der größeren Zahl von Zyklonen, die von Norwegen nach Nordosten ziehen, von Bedeutung ist. Ideal für die Erklärung der Zyklonalität eines Raumes wäre daher eine Kombination von Methoden, die sowohl Zyklonen als auch Fronten in gleicher Weise berücksichtigte; eine solche Synthese zweier verschiedener Arbeitsweisen muß aber einer späteren Untersuchung vorbehalten bleiben.

II. Analytischer Teil

A. Die Arbeitsgrundlagen

1. Das Ausgangs- und Arbeitsmaterial

Für die Untersuchung der vorliegenden Arbeit wurden die in der Bundesrepublik Deutschland zur Verfügung stehenden Wetterkarten der Offenbacher Wetterdienstzentrale und des Seewetteramtes Hamburg herangezogen. Als Arbeitsgrundlage dienten aus dem "Täglichen Wetterbericht" vornehmlich die Bodenwetterkarten von 0^h und 6^h Weltzeit (GMT), die Höhenwetterkarten der absoluten Topographie 500 mb von 0^h, auf der die Isohypsen im Abstand von 4 geopotentiellen Dekametern gezeichnet sind, sowie die Karte der relativen Topographie 500/1000 mb, in der die Isogeopotentialen ebenfalls im Abstand von 4 gdm eingetragen sind. Weiterhin wurde die Hamburger Wetterkarte verwendet, in der für den Termin 13 Uhr (12 Uhr GMT) die synoptische Situation im Bodendruckfeld und im 500 mb-Niveau wiedergegeben wird. In letzterer Karte sind die Isohypsen allerdings nur im Abstand von 12 gdm gezeichnet.

Bei der Durchsicht der Wetterkarten von 1957 bis 1966 wurde die Zahl der untersuchten Tiefdruckgebiete auf zweierlei Weise eingeschränkt. Einmal wurden nur solche Zyklonen aufgenommen, die mindestens einmal in einer der veröffentlichten Wetterkarten mindestens eine geschlossene Isobare aufwiesen; Tiefdruckausläufer und Nebenkerne ohne eigene geschlossene Isobaren wurden also nicht mit erfasst. Mit dieser Beschränkung auf abgeschlossene Systeme wurde ein subjektiver Einfluß weitgehend ausgeschaltet. Zweitens tritt ganz allgemein eine Siebung der Druckgebilde dadurch ein, daß in den deutschen Wetterkarten die Bodenisobaren nur im Abstand von 5 mb gezeichnet werden. Flachere Vertiefungen, die vielleicht noch von einer 2,5 mb-Isobare umschlossen wären, treten somit nicht in Erscheinung, was sich besonders im Zusammenhang mit den quasifrontenlosen flachen Bodenzyklonen bemerkbar macht (Vgl. dazu Kap. II.C.). Dieser Nachteil mußte aber auf Grund der Gegebenheiten in Kauf genommen werden.

Für jedes der diesen Auswahlkriterien genügenden Tiefdruckgebiete wurde ein eigenes Arbeitsblatt angelegt, wie es Abb. 1 (S.11) zeigt. In der Bodenkarte, die die Situation des 6^h-Termins darstellt, wurden die Positionen des Tiefs mit seinen Fronten sowie den auffälligsten Wettererscheinungen in verschie-

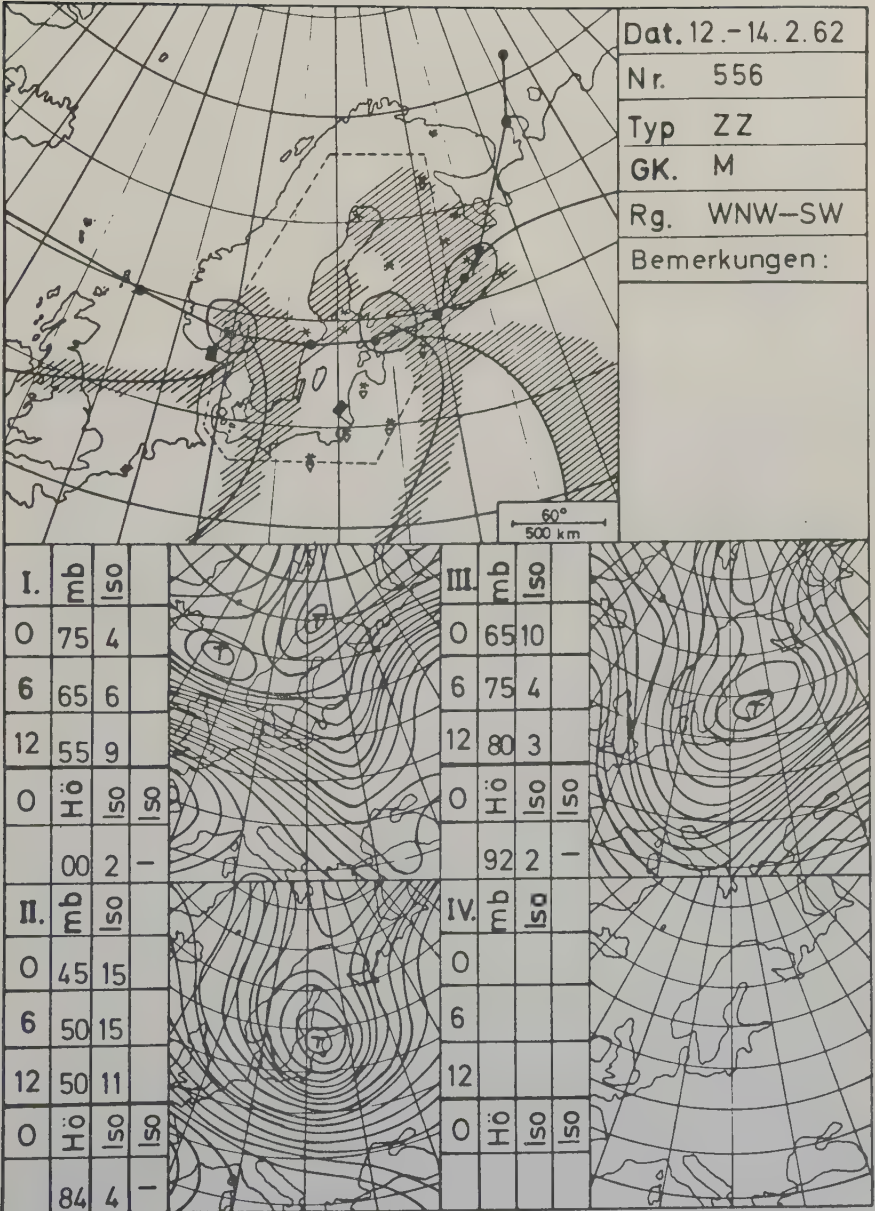


Abb. 1

Muster eines Arbeitsblattes

denen Farben eingetragen. Handelte es sich um eine wandernde Zyklone, so wurden die jeweiligen Positionen zu einer Zugbahn verbunden. Rechts neben der Karte wurden außer dem Datum, der laufenden Nummer und dem Zyklontyp auch, soweit es sich um eine Bahnzyklone handelte, der Geschwindigkeitskoeffizient (GK.) und die Zugrichtung (Rg.) vermerkt. **Darunter** wurden besondere Erscheinungen wie "höchster im Untersuchungszeitraum aufgetretener Kerndruck", "ausgeprägte Sturmzyklone" oder Ähnliches notiert. Im unteren Teil des Plattes wurden einmal die Kerndrucke jedes Tages für die Termine 0^h , 6^h und 12^h im Boden- und Höhendruckfeld sowie die Zahl der geschlossenen Isobaren, Isohypsen und Isopotentialen verzeichnet. - Angeregt durch eine Arbeit von B.ERIKSSON (1967) über die Wahrscheinlichkeitsverteilung einzelner Wetterelemente in Schweden bei verschiedenen europäischen Großwetterlagen war in der jetzt freien Spalte für jeden Tag die Großwetterlage nach P.HESS und H.BREZOWSKY eingetragen worden. Bei der Auswertung der Arbeitsblätter hat sich aber gezeigt, daß diese Großwetterlagen für Nordeuropa, soweit es sich um Tiefdruckzugbahnen handelt, wenig zur Erhellung der Bahnfrage beitragen, denn dieselbe Zugrichtung wird bei ganz verschiedenen Großwetterlagen eingeschlagen. Darin zeigt sich, daß diese vornehmlich auf mitteleuropäische Verhältnisse aufbauende Typisierung erst noch um eine spezielle nordeuropäische Variante erweitert werden müßte, bevor sie in einer Arbeit wie der vorliegenden von Nutzen wäre. Auf eine Eintragung im Musterblatt wurde deshalb hier verzichtet. - Neben diesen Angaben wurde in den kleinen Karten die Höhendruckverteilung für den 0^h -Termin festgehalten. Auf der Rückseite des Arbeitsblattes wurde dann der Witterungsablauf in groben Zügen festgehalten.- Nach Durchsicht aller 10 Jahre ergab sich für den Ostseeraum die Zahl von 1404 Arbeitsblättern.

2. Die Jahreszeiteneinteilung

Bei der Untersuchung der Zyklonalität eines Raumes taucht sogleich die Frage auf, welche Jahreszeiteneinteilung zur besseren Darstellung zu verwenden ist. Hier wäre es wünschenswert gewesen, eine Gliederung nach "natürlichen Jahreszeiten", d.h. nach Witterungsregelfällen, zu Grunde zu legen, aber eine diesbezügliche Untersuchung steht für Nordeuropa noch aus und

konnte bei dem hier verwendeten Material wegen der Kürze des untersuchten Zeitraumes auch nicht selbst erstellt werden. Würde man dagegen die für Mitteleuropa gebräuchlichen meteorologischen Jahreszeiten auf den Ostseeraum anwenden, dann könnte ein unzutreffender Eindruck hervorgerufen werden, denn diese Jahreszeiten mögen für den südlichen Ostseeraum vielleicht noch eine gewisse Gültigkeit haben, für das Gebiet als Ganzes treffen sie aber in keiner Weise mehr zu, wenn man bedenkt, daß im nördlichen Ostseeraum der Winter im Mittel von Oktober bis April reicht (Vgl. J. BLÜTHGEN, 1948) und die Übergangsjahreszeiten Frühling und Herbst sich hier auf die Monate Mai bzw. September beschränken. Deshalb wurde die Frage nach einer natürlichen Jahreszeitengliederung offen gelassen und ganz schematisch vorgegangen, indem vier gleich lange Zeitintervalle festgelegt wurden, um bei der kartographischen Darstellung eine gewisse Übersichtlichkeit zu gewährleisten. Als solche wurden die astronomischen Jahreszeiten gewählt, die entsprechend den Solstitien und Äquinoktien am 21. der Monate März, Juni, September und Dezember beginnen. Dabei versteht es sich, daß dieser Einteilung nur ein formaler Wert zukommt, da gerade im Ostseeraum wegen seiner großen Nord-Süd-Erstreckung und seiner nördlichen Lage in der Länge und im Beginn der Jahreszeiten große Unterschiede auftreten (Vgl. A. WALLÉN 1930, Tabelle der Jahreszeitenanfänge, S. 24). Deshalb wird bei der Beschreibung jedes Typs das zeitliche Auftreten von Zyklonen durch eine Kurve des Jahresganges auf Monatsbasis dargestellt und auch der synthetischen Darstellung des Jahresganges der Zyklonalität in Teil III eine Monatseinteilung zu Grunde gelegt. Die Bezeichnungen Frühling, Sommer, Herbst und Winter sind also im Folgenden nur als formale Gliederungsintervalle anzusehen.

B. Die Tiefdruckgebiete

1. Die Einteilung der Tiefdruckgebiete

Der erste Schritt zur Erfassung der Zyklonalität eines Raumes muß darin bestehen, die Frage nach der Art der vorkommenden Tiefdruckgebiete zu beantworten. Hier wäre es denkbar, den gesamten Lebenslauf eines Tiefs vom Anfang bis zum Ende zu verfolgen und es dann auf Grund seiner vollzogenen Entwicklung einem bestimmten Tiefdrucktyp zuzuordnen. Diese nicht raumbezogene,

mehr klimatologisch bzw. meteorologisch ausgerichtete Betrachtungsweise wäre aber in dieser klimageographischen Arbeit fehl am Platze, denn da hier das Ostseegebiet der Untersuchung zu Grunde liegt, ist es relativ uninteressant, ob sich z.B. eine von der Nordsee nach Osten ziehende unbedeutende Welle über Nordrußland zu einem mächtigen Zentraltief entwickelt. Viel wichtiger ist es dagegen in unserem Zusammenhang, welche Wettererscheinungen mit dem Tief bei seinem Durchzug durch das Ostseegebiet verbunden sind, da den Klimageographen die witterungsmäßige Beeinflussung eines Raumes letztlich am meisten interessiert. Eine solche Analyse der Wirksamkeit einer Zyklone, in die die zeitlichen und räumlichen Faktoren eingehen, setzt aber eine so differenzierte Untersuchung des Einzeltiefs voraus, daß diese Aufgabe bei der großen Zahl der Fälle nur in Gemeinschaftsarbeit und unter Einsatz moderner Datenverarbeitungsmaschinen zu bewältigen ist. Um aber unter den gegebenen Umständen dennoch die Wirksamkeit, wenn auch nur in vergrößerter Form, in die Klassifikation der Zyklonen eingehen zu lassen, wurde vorausgesetzt, daß die Art und Dauer der verschiedenen Wettererscheinungen wie Niederschlag, Temperatur, Bewölkung oder Wind sowohl in der Horizontalen mit der Art und Anordnung der Fronten als auch in der Vertikalen mit der Mächtigkeit eines Tiefdruckgebietes zusammenhängen. Unter dieser Annahme wurde eine Differenzierung der Zyklonen nach ihrer dreidimensionalen Struktur vorgenommen, die sie bei ihrem Durchzug durch das Ostseegebiet aufweisen. Diese Strukturformen sind nicht unbedingt identisch mit Tiefdrucktypen, wenn auch einige Tiefdruckgebiete ihre spezifischen Merkmale während ihrer gesamten Lebensdauer beibehalten; teilweise handelt es sich vielmehr um Entwicklungsstadien im Leben einer "Idealzyklone", wie sie zuerst von J.BJERKNES und H.SOLBERG (1922) dargestellt worden ist. Hier steht aber nicht die Zyklone als Ganzes im Vordergrund der Betrachtung, sondern nur die strukturelle Form desjenigen Stadiums, das in den unmittelbaren Bereich des Ostseeraumes fällt. Der Einfachheit halber wird im Folgenden aber immer, wenn es um die Unterscheidung von Tiefdruckgebieten geht, der Begriff des Tiefdrucktyps verwendet, auch wenn genau gesehen nicht jede Tiefdruckart einen Typ darstellt.

Im folgenden Abschnitt wird zuerst eine Typisierung der Zyklonen im Zusammenhang durchgeführt, wobei sich die Beschreibung der Tiefentwicklung an die von S.P.CHROMOW (1940) und R.SCHERHAG (1948) gegebenen anlehnt. Danach werden die einzelnen Typen an Hand ausgewählter Wetterkartenbeispiele näher erläutert, wobei auch etwas weiter auf die begleitenden Wettererscheinungen eingegangen wird.

Hervorgerufen durch die Wechselwirkung zweier verschieden temperierter Luftmassen beginnt eine Frontalstörung ihr Dasein zunächst als flache Welle an einer Massengrenze. Bleibt diese Welle dynamisch stabil, dann läuft sie ohne größere Vertiefung mit hoher Geschwindigkeit an der Massengrenze entlang und löst sich schließlich auf. S.P.CHROMOW (1940, S. 320) bezeichnete dieses Stadium als "Frontalwelle", doch da in neuerer Zeit (Vgl. G.BAHRENBERG, 1968) dieser Ausdruck auf das nächstfolgende Stadium der Zyklonenentwicklung verwendet wurde, soll für die stabile Welle in dieser Arbeit die Bezeichnung Kaltfrontwelle benutzt werden. Auf die Benennung "schleifendes Tief" wurde bewußt verzichtet, da sie auf die nur für Mitteleuropa typische "Schleifzone" hinweist. Dieser von T.BERGERON und G.SWOBODA (1924) geprägte Begriff bezeichnet "ein dichtes Aufeinanderfolgen von Wellenstörungen am Rande einer Mutterzyklone" (J.BLÜTHGEN 1966, S. 327), während die Benennung Kaltfrontwelle nur die frontparallele Bewegungsrichtung eines einzelnen Tiefs bezeichnen soll.

Ist die an der Front entstandene Welle dynamisch instabil, dann vergrößert sich ihre Amplitude, und es entwickelt sich bei fallendem Luftdruck im Kern ein breiter Warmsektor, während sich die Höhenströmung zyklonal zu krümmen beginnt. Ausgehend vom Erscheinungsbild der Fronten im Bodendruckfeld wurde für dieses Stadium nach S.PETTERSEN u.a. (1962) die Bezeichnung Warmsektor-zyklone gewählt. Der Warmsektor, der auf der Vorderseite von der schwach geneigten Grenzfläche der Warmfront und auf der Rückseite von der steileren Diskontinuitätsfläche der Kaltfront begrenzt wird, verengt sich vermutlich auf Grund der Bodenreibung immer mehr, bis die aktivere Kaltfront, die infolge ihres zu meist turbulenten Charakters nicht so stark durch die Bodenreibung gebremst wird, die Warmfront einholt und vom Boden abhebt. Obwohl sich dieser Vorgang der Okklusion tagtäglich abspielt, sind die Ursachen, die dazu führen, noch nicht bis ins Einzelne

bekannt; zurindeist sind sie sicher sehr komplexer Natur. Diese Okklusion beginnt zuerst im Tiefkern und schreitet dann an der Warmfront entlang nach außen fort. Gleichzeitig setzt sich die zyklonale Rotation nach oben hin stärker durch, so daß sich in der Höhe in einiger Entfernung hinter dem Bodentief ein Höhentief zu entwickeln beginnt. S.PETTERSSSEN u.a. (1962) spricht in diesem Zustand von einer "teilweise okkludierten Zyklone" ("partly occluded cyclone"), während G.BAHRENBURG (1968) dieses Stadium "Frontalwelle mit Höhentief" nennt. Da es aber in Mitteleuropa nur einen kurzfristigen Übergang zur Zentralzyklone darstellt, ist es von G.BAHRENBURG nicht als eigener Typ ausgesondert, sondern zur Klasse der "Genetischen Zyklonen" gerechnet worden. Im Ostseeraum entwickeln sich aber viele Zyklonen mit beginnender Okklusion nicht mehr bis zur Zentralzyklone, sondern sterben vorher ab. Hierzu sind besonders die Randstörungen der großen Zentraltiefs zu zählen. Da sich bei beginnender Okklusion eine Änderung der Wettererscheinungen im Tiefkern zeigt, wurde dahingehend differenziert, daß nur Tiefs mit offenem Warmsektor als Warmsektorzyklonen bezeichnet wurden, während die teilweise okkludierten Zyklonen der Typ des Okklusionstiefs bilden.

Mit fortschreitender Okklusion verliert das Tief immer mehr seinen Wellencharakter, bis es schließlich, wenn Boden- und Höhentief übereinander liegen, im Stadium der Zentralzyklone seine größte vertikale und horizontale Erstreckung aufweist. Damit ist der Höhepunkt der Zyklonenentwicklung überschritten; durch Hebungsvorgänge in ihrem Inneren füllt sich die Zyklone mit steigender Mächtigkeit mit kalter Luft, so daß sie sich zum frontenlosen Kalten Tief wandelt, in dessen Bereich keine Luftmassenunterschiede mehr vorhanden sind. Das Bodentief stirbt langsam ab, während ein Höhenwirbel mit einem troposphärischen Kältezentrum, der sogenannte Kaltlufttropfen, zurückbleibt, der sich später auflöst. Damit ist der Lebenslauf der Idealzyklone beendet.

Jedes dieser genannten Entwicklungsstadien wurde als ein eigener Zyklontyp aufgefaßt. Wandelte sich die Struktur eines Tiefs über dem Ostseeraum nur unwesentlich, dann wurde über die einzelnen Stadien gemittelt und die Zyklone dem Typ zugerechnet, dem sie ihrer Strukturform nach beim Durchzug die längste Zeit angehörte. Nur wenn ein Tief eine wesentliche Zustandsänderung durchmachte, wie sie der Übergang von der flachen Welle zum

tieften Wirbel unter Ausbildung eines Höhentiefs darstellt, wurde es einem eigenen Typ zugeordnet. Zu diesem Typ wurden auch die Fälle gerechnet, in denen sich das Höhentief nicht erst durch die Rotation vom Boden her bildete, sondern in denen es schon als Kaltlufttropfen vorher bestand und sich mit dem Bodentief vereinigte. Für diesen Typ ist von G. BAHRENBURG (1968) die Benennung "Genetische Zyklone" eingeführt worden. Da aber auch eine Zustandsänderung, die dadurch erfolgt, daß sich ein Höhentief dauerhaft bis ins Bodendruckfeld durchsetzt, als "genetisch" bezeichnet werden müßte, soll diese Benennung hier nicht verwendet werden. Stattdessen wird diese Art von Zyklonen, bei denen sich die Zyklonale Rotation innerhalb des Ostseeraumes von unten nach oben durchsetzt, mit dem Begriff "Aszendierende Zyklone" (abgekürzt: Aszend.Zykl.) bezeichnet (Vgl. als Gegenstück dazu die "Deszendierende Zyklone" S.23).

Obwohl jede Zyklonenentwicklung individuellen Abweichungen unterliegt, die nicht zuletzt durch die Gestalt der Erdoberfläche bedingt sind, kann man doch bei vielen vollentwickelten Druckgebilden immer wieder eine Parallelität zum Lebenslauf der Idealzyklone feststellen. Daneben gibt es aber auch Tiefdruckgebiete, deren Entstehung auf anderen Ursachen beruht und deren weitere Entwicklung entweder erst später in den Formen der Idealzyklone verläuft oder die sich als spezifische Beispiele ihrer Art bis zum Absterben erhalten.

Verläuft eine Kaltfront nicht, wie bei den Kaltfrontwellen häufig der Fall, parallel zur Höhenströmung, sondern senkrecht zu ihr, dann bildet sich an der Front oft ein Kaltfronttief, dessen frontrechtwinklige Bewegungskomponente größer ist als die frontparallele. Dieser Tiefdrucktyp ist allerdings nicht ganz identisch mit G. BAHRENBURG'S Kaltfronttief, denn unser Tief ist angesichts der andersgearteten topographischen Gegebenheiten des Ostseeraumes vorwiegend auf Grund der Einflüsse der Oberflächenformen bedingt. Die Lebensdauer des Kaltfronttiefs überschreitet im allgemeinen nicht 24 Stunden.

Ein weiterer, ausschließlich an Kaltfronten gebundener Typ ist das Kaltluftstaffeltief, im Folgenden verkürzt Staffeltief genannt, das sich fast immer nur im Zusammenhang mit Ausbrüchen polarer Kaltluft bildet und dem deshalb eine Warmfront fehlt. Bei diesen Fronten handelt es sich meistens um "Fronten zweiter Ordnung" (R. SCHERHAG 1948, S. 249), die sich innerhalb einer

einheitlichen polaren Luftmasse bilden.

"Secondary fronts may form temporarily within air masses when the distribution of temperature and wind is favourable for frontogenesis. Such fronts form rarely within the equatorial, the tropical and the arctic air masses because these masses are usually so homogeneous that the horizontal temperature gradient is insufficient for the production of fronts. Secondary fronts form most frequently within the polar air masses, notably between 'old' and 'fresh' polar air or between polar maritime and polar continental air. The secondary fronts are usually neither extensive nor long-lived, ... (S.PETTERSEN 1940, S. 286 f).

Diese Kaltluftstaffeln sind typische Erscheinungen auf der Rückseite von Höhenträgen, wenn hinter ostwärts abziehenden Zyklonen oder vor sich über dem Nordmeer aufwölbenden Hochkeilen Kaltluft nach Süden ausfließt. An der Bodenkaltfront, die meist senkrecht zur Frontalzone verläuft, bilden sich ausschließlich am linken Ende (in Strömungsrichtung gesehen) oft flache Tiefs, da hier die zyklonale Krümmung der Stromlinien am stärksten ist (Vgl. E.PALMEN und C.W.NEWTON, 1951). Diese Staffeltiefs bleiben aber selten länger als 24 Stunden erhalten.

Eine weitere, ausschließlich an einen bestimmten Frontentyp gebundene Zyklogenese findet im Zusammenhang mit einer Warmfront statt. Wird Warmluft auf der Vorderseite einer von Westen heranziehenden Zyklone nach Norden verfrachtet, dann bildet sich gelegentlich eine Warmfrontwelle. Sie unterscheidet sich wesentlich von den Kaltfrontzyklonen, denn da kein nennenswerter Kaltlufteinbruch auf ihrer Rückseite erfolgen kann, fehlt ihr die zur Verwirbelung notwendige Energie. Sie behält deshalb ihren Wellencharakter längere Zeit bei. - Im Untersuchungsraum treten Warmfrontwellen aber nur sehr selten auf. Ihre geringe Zahl erklärt sich dadurch, daß sich viele Wellen dieser Art über dem Atlantik bilden und zwischen Island und den Britischen Inseln nach Nordosten ziehen. Vor der norwegischen Küste stößt dann aber polare Kaltluft auf ihrer Rückseite nach Süden vor, so daß die Warmfront rückläufig wird. Die ehemalige Warmfrontwelle löst sich damit von der Mutterzyklone, verwirbelt stärker und tritt auf einer meist nach Südosten gerichteten Bahn als Warmsektorzyklone oder Okklusionstief in den Ostseeraum ein. - Zum Typ der Warmfrontwellen wurden auch die nur in geringer Zahl auftretenden Teiltiefbildungen an einer Warmfront gezählt, die nur zu einem Termin sichtbar sind. Bei ihnen handelt es sich nicht eigentlich um eine Welle; um aber die Zahl der Typen nicht zu groß werden zu lassen, wurden sie nicht als eigener Typ behandelt.

Neben diesen, an Grenzflächen zweier verschieden temperierter Luftmassen gebundenen Tiefdruckgebieten, die sowohl kurzfristig als auch längerlebig auftreten können, entstehen im Ostseeraum auch Bodentiefs ohne Fronten. Da es sich bei ihnen vorwiegend um flache und nur kurzfristig sichtbare Druckgebilde handelt, ergeben sich bei dem zur Verfügung stehenden Wetterkartenmaterial gewisse Schwierigkeiten, wenn man sie bestimmten Typen zuordnen will, denn bei ihrer Genese spielen Einflüsse der Luftmasse, des erwärmten Untergrundes und des orographisch beeinflussten Strömungsfeldes zugleich eine Rolle. Trotzdem wurde der Versuch unternommen, die quasifrontenlosen Bodenzykklonen weiter zu untergliedern. Obwohl immer alle drei Einflüsse zusammen beteiligt sind, ist doch die eine oder andere Komponente stärker wirksam, so daß sie als Unterscheidungskriterium herangezogen werden kann, um drei verschiedene Typen von Bodenzykklonen auszusondern. Der Unsicherheit, die darin begründet liegt, daß der Klassifikation teilweise nur sehr wenig Fälle zu Grunde liegen, ist sich der Verfasser dabei wohl bewußt.

Wenn sich die zyklonale Rotation der Kaltluft unter Höhenträgen über einer wärmeren Unterlage bis zum Boden hin durchsetzt, bilden sich flache Tiefs, die von allen quasifrontenlosen Bodenzykklonen die längste Lebensdauer aufweisen. In den meisten Fällen ist über ihnen eine abgeschlossene "Kaltluftinsel" (Vgl. W.KÖNIG, 1947) oder wenigstens eine Kaltluftzunge vorhanden. Während die kalte Luftmasse die Voraussetzung schafft, geht der auslösende Impuls für die Tiefbildung von der labilisierenden Unterlage aus. Diese stellt im Sommer das stark erhitzte Festland und im Winter das warme Wasser der Ostsee dar. Auf Grund dieser Abhängigkeit von einer wärmeren Unterlage wurden diese Zyklonen als "Thermische Tiefs" bezeichnet.

Mehr dynamisch bedingt und damit abhängig von den Gegebenheiten des Untersuchungsraumes sind die anderen beiden Typen, obwohl der Jahresgang ihrer Häufigkeit auch eine Beteiligung der Unterlage an der Tiefbildung anzeigt. - Stellt sich über dem Ostseeraum eine leicht antizyklonal gekrümmte West- bis Nordwestströmung ein, dann bilden sich vornehmlich im Skagerrak durch die orographisch bedingte Störung des Strömungs- und Druckfeldes flache Leetiefs, die meist nur kurzfristig sichtbar sind.

Ein weiterer, mit den Leetiefs eng verwandter quasifrontenloser Bodentiefdrucktyp, der im Ostseeraum auftritt, wurde mit Resonanztief (Vgl. G.SCHINZE und R.SIEGEL 1943, S. 118) bezeichnet. Dieser Terminus wird in der Wetterübersicht des "Täglichen Wetterberichtes" gewöhnlich für die Bildung von Genua-Zyklonen gebraucht; er wurde aber auch auf Genesen im Ostseeraum angewendet. Diesen Begriff etwas mehr präzisierend soll in dieser Untersuchung von Resonanztief gesprochen werden, wenn sich quasifrontenlose Tiefdruckgebiete ostwärts der Skanden bilden, die in engem Zusammenhang mit kräftigen Zentralzyklonen über dem Nordmeer stehen. Während dieses Muttertief vor Norwegen nach Nordosten zieht und auch mit seinem Höhentief immer über dem Nordmeer bleibt, weiten sich die Bodenisobaren mitunter immer weiter über das Gebirge hinweg nach Osten aus, bis schließlich sich in dem "Isobarensack" über dem Ostseegebiet ein abgeschlossenes Resonanztief ausbildet, das aber immer noch innerhalb der Mehrzahl der Isobaren des Zentraltiefs liegt. Mit dieser Abhängigkeit von einem Muttertief unterscheiden sich diese Zyklonen von den Leetiefs, obwohl bei beiden Typen die Ursachen ihrer Genese noch nicht mit letzter Klarheit feststehen. Gerade bei den Resonanztiefs muß die Frage offen bleiben, iroweit es sich bei ihnen wirklich um selbständige Tiefdruckgebiete handelt, da wegen der geringen Anzahl der Stationen auch eine strömungsmäßige Analyse oft nicht zu einer Entscheidung führt. - Da der Kerndruck dem des Muttertiefs gleicht oder sich geringfügig über diesem bewegt, ist es für die Resonanztiefs typisch, daß sie von allen frontenlosen Bodenzuklonen die tiefsten Kerndrucke aufweisen.

Mit diesem Typ ist die Reihe der hauptsächlich im Bodendruckfeld in Erscheinung tretenden Tiefdruckgebiete beendet. Nun kann aber die Zyklonalität eines Raumes durch die Bodenzuklonen allein nicht erklärt werden. So treten z.B. häufiger Niederschläge auf, ohne daß am Boden ein Tiefdruckgebiet oder auch nur eine Konvergenz zu erkennen ist. Für die Erklärung dieser Erscheinung muß die synoptische Situation in der Höhe herangezogen werden, über die die Höhenwetterkarten Auskunft geben. Dieser Schritt in das spezielle Gebiet der Meteorologie ist hier nicht Selbstzweck, sondern "die höhere Atmosphäre hat für den Geographen nur insofern Interesse, als die in ihr ermittelten Befunde zur Deutung des erdnahen Witterungsablaufs herangezogen werden müssen" (J.

BLÜTHGEN 1965, S. 44 f). Ein solcher Fall liegt immer dann vor, wenn ein nur in der Höhe ausgebildeter Kaltlufttropfen das Wetter eines Raumes bestimmt. Da diese Höhenzyklonen nach W. BUSCHNER (1951) meist von der 850 mb-Fläche bis zur 400 mb-Fläche reichen, wird zu ihrer Untersuchung im allgemeinen die Karte der in 5-6 km Höhe gelegenen 500 mb-Druckfläe herangezogen, die auch die Atmosphäre in zwei ungefähr gleich große Hälften teilt. Als weiteres Hilfsmittel dient die Karte der relativen Topographie 500/1000 mb, die Auskunft gibt über die Mächtigkeit der zwischen beiden Bezugsflächen liegenden Kaltluftmassen.

Bei der Beschreibung des Lebenslaufs der "Idealzyklone" war schon darauf hingewiesen worden, daß der Kaltlufttropfen das letzte Stadium ihrer Entwicklung darstellt, wenn sich nämlich das Bodentief aufgelöst hat und nur in der Höhe ein Wirbel über einem troposphärischen Kältezentrum zurückbleibt. Diese aus Resten gealterter Zyklonen hervorgegangenen Kaltlufttropfen machen aber nur einen kleinen Teil aller Tropfen aus (Vgl. W. WEIMANN 1958, S. 22). Weitaus häufiger kommt es vor, daß hochreichende Kaltluft, die in einem Trog in südliche Richtungen vorstößt, durch zwei von Osten und Westen gegen die Flanken des Troges gerichtete Warmluftvorstöße von ihrem polaren Quellgebiet abgeschnitten wird. Dabei kommt es im Verlauf der Abschnürung zur Ausbildung eines Höhenwirbels, so daß diese Kaltlufttropfen eigengenetische Gebilde darstellen (Vgl. H. KRUHL, 1948).

Auf eine kritische Sichtung der in der Literatur unterschiedlich gehandhabten Begriffsbestimmungen von Kaltlufttropfen kann hier verzichtet werden, da sich eine solche bei U. KÜHN (1956), W. WEIMANN (1958) und G. BAHRENBURG (1968) findet. Während in der Wetterübersicht des "Täglichen Wetterberichtes" schon von Kaltlufttropfen gesprochen wird, wenn sich eine Kaltluftmasse durch mindestens eine geschlossene Isogeopotiale in der relativen Topographie 500/1000 mb auszeichnet, wird in dieser Arbeit die Definition von W. WEIMANN (1958) zu Grunde gelegt. Nach ihr handelt es sich bei Kaltlufttropfen um troposphärische Kältezentren (geschlossene Isolirie in der rel. Top. 500/1000 mb) mit einem abgeschlossenen Höhentief (geschlossene Isolinie in der absoluten Top. 500 mb). "Die Bodenströmung ist antizyklonal oder schwach zyklonal, d.h. es ist entweder kein abgeschlossenes Bodentief vorhanden oder nur ein meist sehr kleiner, sekundär induzierter Wirbel, der frontenlos sein muß, da es sich um eine

einheitliche Luftmasse handelt" (derselbe, S. 6.). - Da es W. WEJMANN hauptsächlich auf die Untersuchung der "echten" Kaltlufttropfen ankam, wurden von ihm nur solche Fälle bearbeitet, die an mindestens drei aufeinanderfolgenden Tagen zu verfolgen waren. Hier steht jedoch die zyklonale Beeinflussung des Raumes im Vordergrund, weshalb auch Tropfen, die nur an einem Tag sichtbar sind, berücksichtigt wurden. Aus dem gleichen Grund wurde auch W. WEJMANNS Auswahlbedingung hinsichtlich der Intensität (mindestens 2 geschlossene Isolinien in der absoluten Topographie in der Mehrzahl aller Tage) nicht übernommen, sondern es wurden alle Tropfen behandelt, die mindestens einmal eine geschlossene Isolinie in beiden Topographien zugleich aufwiesen.

Hinsichtlich der Zahl der geschlossenen Isohypsen^{+) bei maximaler Intensität ergab sich folgendes Bild:}

Tabelle 1: Verteilung der Kaltlufttropfen nach der Zahl der geschlossenen Isohypsen

Kaltlufttropfen mit	einer geschlossenen	Isohypse	55
"	" zwei	" Isohypsen	42
"	" drei	"	27
"	" vier	"	9
"	" fünf	"	7
"	" sechs	"	4
"	" sieben	"	1
"	" acht	"	1
Summe:			146

Da die Zahl der geschlossenen Isohypsen in etwa ein Maß für die Intensität eines Tropfens gegenüber seiner Umgebung darstellt, wurden auf Grund der vorgefundenen Häufigkeitsverteilungen folgende Typen gebildet:

- Schwache Kaltlufttropfen (eine geschlossene Isohypse)
- Mittlere Kaltlufttropfen (zwei geschlossene Isohypsen)
- Starke Kaltlufttropfen (drei geschlossene Isohypsen)
- Intensive Kaltlufttropfen (vier und mehr geschl. Isohypsen.)

Auf Grund der unterschiedlichen Wetterwirksamkeit wurde der Typ des schwachen Tropfens noch weiter unterteilt in "schwache Tropfen bei flacher Höhendruckverteilung" (schwach/flach) und in "schwache Tropfen in einem symmetrischen Höhentrog" (schwach/Trog).

^{+) Im meteorologischen Sprachgebrauch werden die Isogeopotentialen der absoluten Topographie 500 mb meist vereinfachend Isohypsen genannt (Vgl. K. KEIL, 1950).}

Gegen diese Einteilung könnte man mit Recht den Einwand geltend machen, daß sich Kaltlufttropfen mit zwei bzw. drei geschlossenen Isohypsen nicht so grundlegend voneinander unterscheiden, als daß sie zwei verschiedene Typen darstellen würden. Es wäre sicherlich besser, Klassen zu bilden, in denen jeweils Kaltlufttropfen mit einer unterschiedlichen Zahl von Isohypsen zusammengefaßt wären (z.B. Klasse "stark": 3-5 geschlossene Isohypsen). Da aber in Kapitel II.E. die zyklonale Beeinflussung des Ostseeraumes nach der Herkunftsrichtung der Tropfen differenziert werden soll, würden bei der relativ geringen Zahl der aufgetretenen Fälle durch eine solche grobe Klasseneinteilung alle feineren Unterschiede verwischt werden. Eine solche Einteilung erfordert eine wesentlich größere Population, weshalb hier, von den Gegebenheiten, wie sie Tab. 1 zeigte, ausgehend, die oben angeführte Typeneinteilung gewählt wurde.

Für einen Kaltlufttropfen war es "per definitionem" typisch, daß er sich im Bodendruckfeld überhaupt nicht oder nur in sehr geringem Maße bemerkbar macht (s.o.). Nun kommt es aber im Gegensatz zu Mitteleuropa (Vgl. G.BAHRENBERG 1968, S. 24) gar nicht so selten vor, daß sich über dem Untersuchungsgebiet die zyklonale Rotation aus der Höhe durch "vertikalen Impulsaustausch" (H.MEYER, 1953) bis zum Boden durchsetzt, so daß sich unter dem Höhenwirbel ein beständiges Bodentief ausbildet. Da es sich hier um eine wesentliche Änderung der vertikalen Struktur einer Zyklone handelt, die von oben nach unten erfolgt, soll für diesen Typ die Bezeichnung Deszendierende Zyklone (abgekürzt: Deszend. Zykl.) verwendet werden. Der Tiefdrucktyp in dem hier verwendeten Sinne ist zuerst von R.SCHERHAG (1962, S. 28) beschrieben worden. Es handelt sich dabei um "junge, aktive, vor allem in der Höhe ein ausgesprochenes Druckminimum und Kältezentrum aufweisende Zyklonen" (ebenda). Die von R.SCHERHAG verwendete Bezeichnung "Polartief" wurde hier nicht übernommen, da dieser Begriff schon für den ausgedehnten dynamischen Tiefdruckwirbel über der Polkappe vergeben ist, der sich im Mittel über dem thermisch bedingten bodennahen Polarhoch ausbreitet (Vgl. J.BLÜTHGEN 1966, S. 398). Die Deszendierenden Zyklonen entstehen gelegentlich, wenn sich nach Abschnürung einer polaren Kaltluftmasse ein Höhenwirbel ausbildet, dessen durch die kalten Luftmassen in der Höhe erzeugte zyklonale Rotationsenergie sich bis in die untersten Schichten ausweitet, so daß Bodentief,

Kältezentrum und Höhentief fast senkrecht übereinander liegen. Die Kaltluft setzt sich fast immer bis zum Boden durch und bildet eine scharf ausgeprägte Kaltfront aus, so daß sich im Bodendruckfeld die Deszendierende Zyklone und das Staffeltief gleichen. Nur ist eben letzteres nicht mit einem Höhenwirbel, sondern nur mit einer Kaltluftzunge verbunden, woraus seine geringere Lebensdauer resultiert.

Nachdem nun sämtliche im Untersuchungsgebiet auftretenden Tiefdruckgebiete klassifiziert worden sind, soll eine Gliederung der Typen durchgeführt werden, aus der auch hervorgeht, mit welcher Häufigkeit jeder Typ aufgetreten ist. Da für den geographisch orientierten Betrachter die Wetterwirksamkeit eines Tiefs von ausschlaggebender Bedeutung ist und diese wiederum zu- meist in Abhängigkeit von der vertikalen Struktur der Zyklonen steht, lassen sich die Tiefdruckgebiete entsprechend ihrem Aufbau in drei große Klassen einteilen. Von ihnen enthält die erste alle Typen, die nur im Bodendruckfeld ausgeprägt sind, während die zweite Klasse alle Typen umfaßt, die sowohl am Boden als auch in der Höhe in Erscheinung treten. In der dritten Klasse sind dann die reinen Höhentiefs zusammengefaßt. Berücksichtigt man jetzt noch das Vorhandensein oder die Struktur der Fronten, dann kommt man zu der Einteilung, wie sie Tabelle 2 zeigt. Aus ihr geht hervor, daß fast genau $2/3$ aller Tiefs allein im Bodendruckfeld ausgeprägt sind. Während bei den quasifrontenlosen Zyklonen nur die flachen Thermischen Tiefs einen nennenswerten Anteil erreichen, sind es bei den Frontalzyklonen die Okklusionstiefs, die in der Häufigkeitsverteilung überstark hervortreten. Die Warmfrontwellen erreichen aus den auf Seite 18 angeführten Gründen die geringste Anzahl. In der zweiten Klasse kommt in der Tatsache, daß die Aszendierenden Zyklonen die Zentralzyklonen an Zahl noch übertreffen, eine stärkere Verwirbelungstendenz innerhalb des Ostseeraumes zum Ausdruck, die den Anlaß zu der in Kapitel II.D.8. durchgeführten genaueren Untersuchung gab. Die frontenlosen Höhenzyklonen stellen die kleinste Klasse dar; sie liegen mit ihrer Zahl noch hinter den quasifrontenlosen Bodenzyklonen.

Tabelle 2: Gliederung und Zahl der aufgetretenen
Tiefdrucktypen

Klasse I. Nur im Bodendruckfeld ausgeprägte Zyklonen <u>959</u> (<u>66,9%</u>)		
A. quasifrontenlos		
1. Thermische Tiefs	128	(9,1 %)
2. Leetiefs	23	(1,6 %)
3. Resonanztiefs	18	(1,3 %)
B. an Fronten oder frontenähnliche Grenz- flächen gebunden		
1. an Kaltfronten		
a. Kaltfrontwellen	62	(4,4 %)
b. Warmsektorzyklonen	119	(8,5 %)
c. Okklusionstiefs	392	(27,9 %)
d. Kaltfronttiefs	134	(9,5 %)
e. Staffeltiefs	46	(3,3 %)
2. an Warmfronten		
Warmfrontwellen	17	(1,2 %)
Klasse II. Im Boden- und Höhendruckfeld ausgeprägte Zyklonen		
		<u>319</u> (<u>22,7 %</u>)
A. Zentralzyklonen	120	(8,5 %)
B. Kalte Tiefs	18	(1,3 %)
C. Aszendierende Zyklonen	123	(8,8 %)
D. Deszendierende Zyklonen	58	(4,1 %)
Klasse III. Nur im Höhendruckfeld ausgeprägte Zyklonen		
		<u>146</u> (<u>10,4 %</u>)
A. Schwache Kaltlufttropfen		
1. bei flacher Höhendruckverteilung	11	(0,8 %)
2. in einem symmetrischen Höhentrog	44	(3,1 %)
B. Mittlere Kaltlufttropfen	42	(3,0 %)
C. Starke Kaltlufttropfen	27	(1,9 %)
D. Intensive Kaltlufttropfen	22	(1,6 %)

Insgesamt : 1404

2. Die Wetterkartenbeispiele der Tiefdrucktypen

Nachdem bisher die Tiefdrucktypen nur in allgemeiner Form beschrieben worden sind, sollen jetzt zum besseren Verständnis die Typen an Hand von konkreten Beispielen aus der Offenbacher Wetterkarte erläutert werden. In den folgenden Abbildungen geben die dick ausgezogenen Linien die Verhältnisse im Bodendruckfeld um 6^h GMT wieder, während die dünn gestrichelten Linien die absolute Höhe der 500 mb-Fläche in gdm bezeichnen. Die Reihenfolge der Typen entspricht der in der Tabelle 2 gegebenen Gliederung.

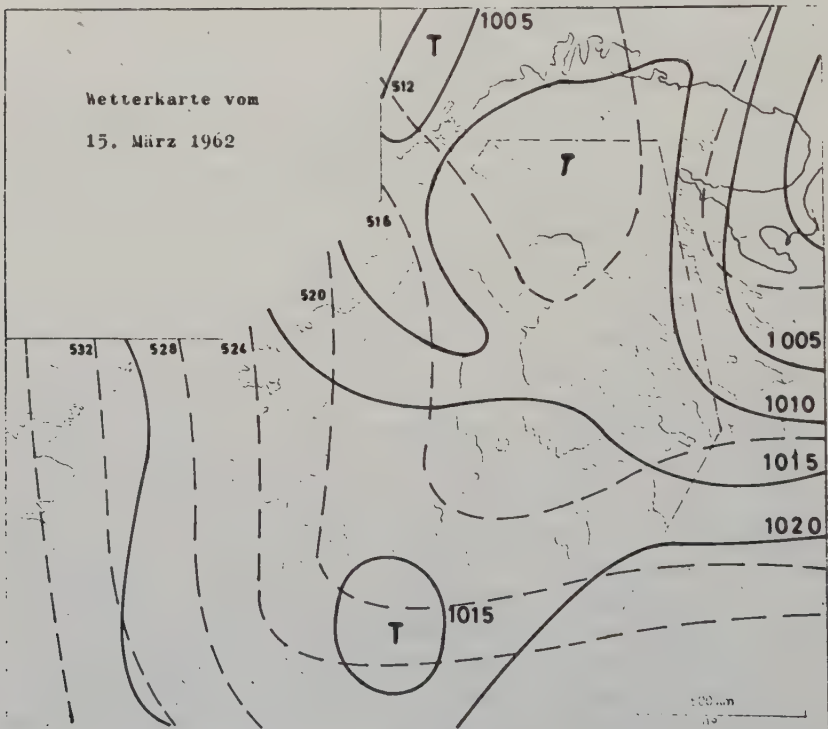


Abb. 2 Thermisches Tief im Winter

Flache Thermische Tiefs sind überwiegend vom Einfluß der erwärmten Unterlage abhängig, die im Winter die Ostsee, im Sommer das Festland darstellt. In der kälteren Jahreszeit sind sie zumeist mit Höhenträgen, Kaltluftinseln oder Kaltluftzungen

verbunden, deren Kaltluft von unten labilisiert wird. Im vorliegenden Beispiel eines winterlichen Thermischen Tiefs hat sich die Zyklone am 14. März innerhalb einer arktischen Luftmasse über der Nordsee gebildet und ist am nächsten Tag in die westliche Ostsee gedriftet. - Im Kern der winterlichen Thermischen Tiefs kommt es zu Schauerniederschlägen und Abkühlung; beides ist aber schwächer entwickelt als bei den hochreichenden Kalten Tiefs.

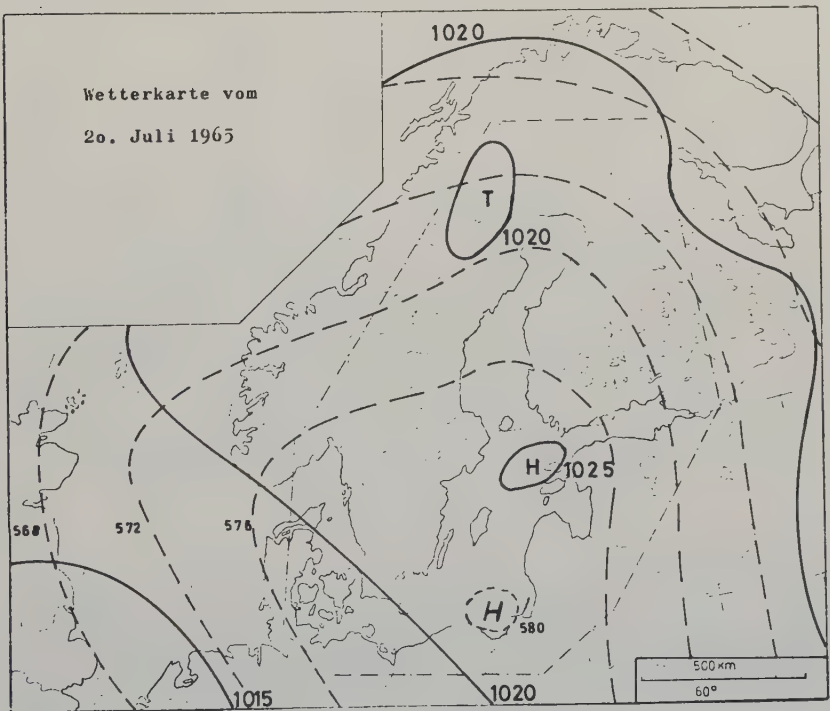


Abb. 3 Thermisches Tief im Sommer

In der wärmeren Jahreszeit ist nicht mehr die Zufuhr von Kaltluft eine unerläßliche Voraussetzung. Thermische Tiefs können sich dann auch unter Hochdruckeinfluß bilden, wenn das Festland durch die Insolation stark erhitzt wird. Deshalb treten sie auch vornehmlich in der (hamburger) Mittagskarte in Erscheinung. Ihre Wetterwirksamkeit ist aber wegen des überlagernden höheren Drucks gering; nur selten treten Gewitter und Schauer auf.

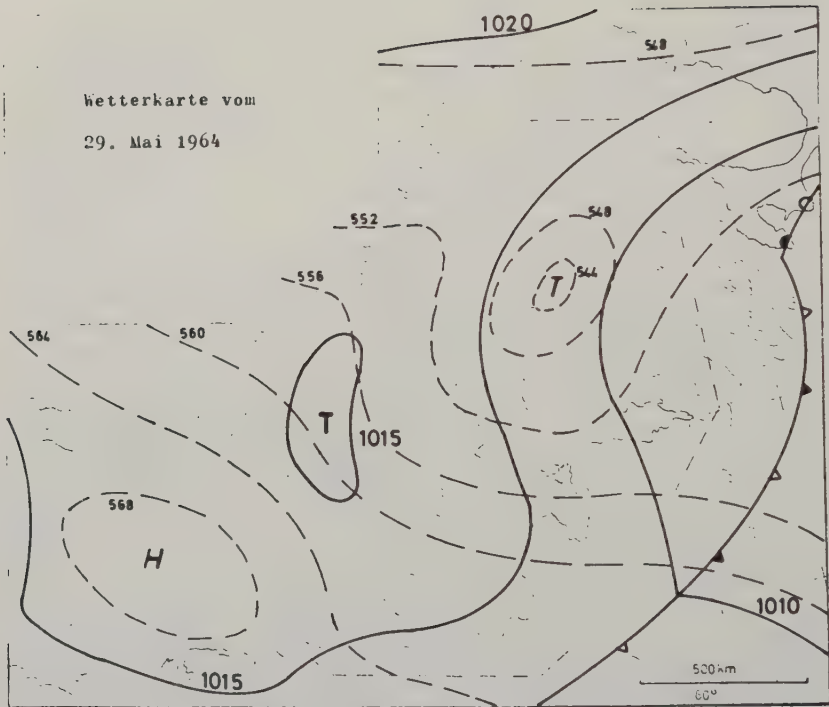


Abb. 4 Leetief

Bei west- bis nordwestlicher Höhenströmung bilden sich vorwiegend im Lee des süd-norwegischen Gebirges durch die orographisch bedingte Deformation des Strömungs- und Druckfeldes flache Leetiefs. Sie sind nicht sehr wetterwirksam und machen sich meist nur durch zyklonal umlaufende Winde bemerkbar.

Vornehmlich im nördlichen Teil des Ostseeraumes bilden sich flache Resonanztiefs, die nur in Verbindung mit stärkeren Zentralzyklonen über dem Nordmeer auftreten. In dem vorliegenden Beispiel war die Mutterzyklone am Vortag vor der norwegischen Küste nach Nordosten gezogen. Am 28. um 0^h weiteten sich die Bodenisobaren bis zur Bottenwiek hin aus, und um 6^h schloß sich in dem Isobarensack ein eigenes Resonanztief ab, das sich aber schon um 12^h wieder mit der inzwischen über der Kolahalbinsel

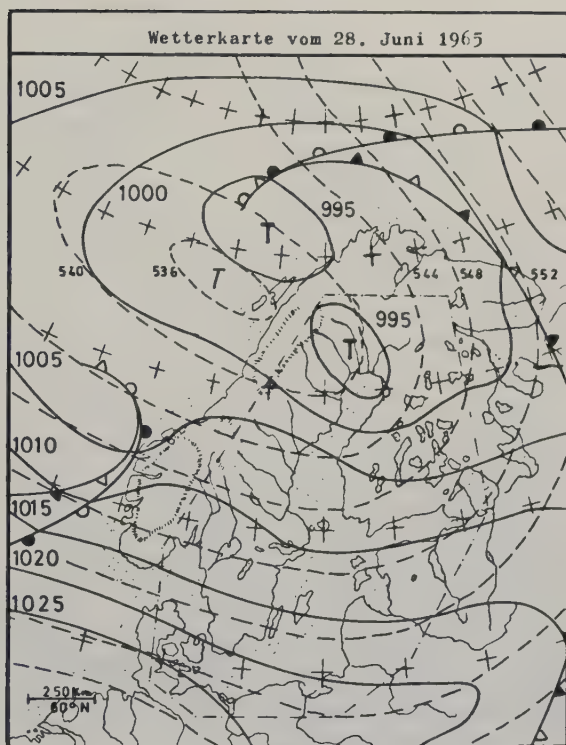


Abb. 5 Resonanztief

liegenden Mutterzyklone vereinigte. - Die Resonanztiefs weisen von allen quasifrontenlosen Bodenzyclonen die geringste Lebensdauer, dafür aber die tiefsten Kerndrücke auf. In ihrem Zentrum kommt es oft zu stärkeren Schauerniederschlägen und zu kräftig auffrischenden Winden.

Kommt es an einer Massengrenze zwischen wärmerer und kälterer Luft zu einer Wellenbildung, dann läuft diese Welle, wenn die Kaltfront parallel zur Höhenströmung liegt, mit größerer Geschwindigkeit an der Front entlang, ohne sich wesentlich zu vertiefen. Einen solchen Fall zeigt Abb. 6 (S. 30), in der sich eine Kaltfrontwelle mit mehr als 50 km/h Geschwindigkeit von der Bretagne nach Südfinnland verlagert. - Kaltfrontwellen treten vornehmlich an der Vorderseite von Höhenträgen auf, so

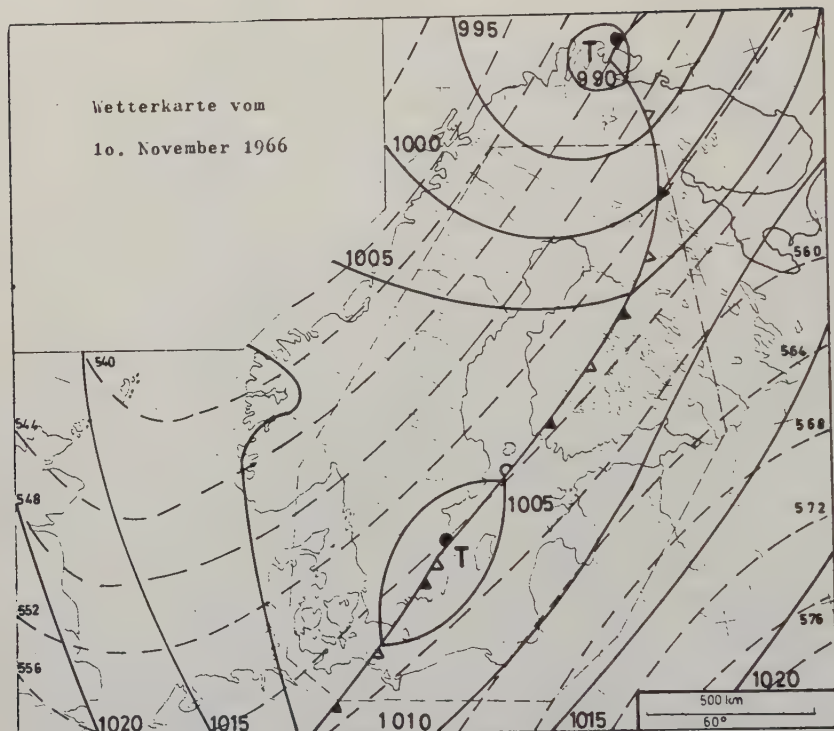


Abb. 6 Kaltfrontwelle

daß ihre Hauptbewegungsrichtung von Südwest nach Nordost verläuft. Da durch die Wellenbildung fortwährend Warmluft gegen die Kaltluft geführt wird, kommt es in einem kleinräumigen Gebiet zu anhaltenden Aufgleitniederschlägen, die sich, wenn mehrere Wellen in schneller Folge an der Luftmassengrenze entlangwandern, zu einem ausgedehnten Dauerregengebiet verzahlen können.

Ist die an der Kaltfront entstandene Welle dynamisch instabil, dann geht sie in das Stadium der Warmsektorzyklone (Abb. 7, S. 31) über. Vor der Warmfront kommt es in einem breiten Band zu Aufgleitniederschlägen, denen nach Durchzug der Warmfront warmes und heiter bis wolkgiges Wetter folgt. Dieses hält so lange an, bis die Kaltfront herangezogen ist, hinter der ein merklicher Temperaturrückgang erfolgt, der häufig von

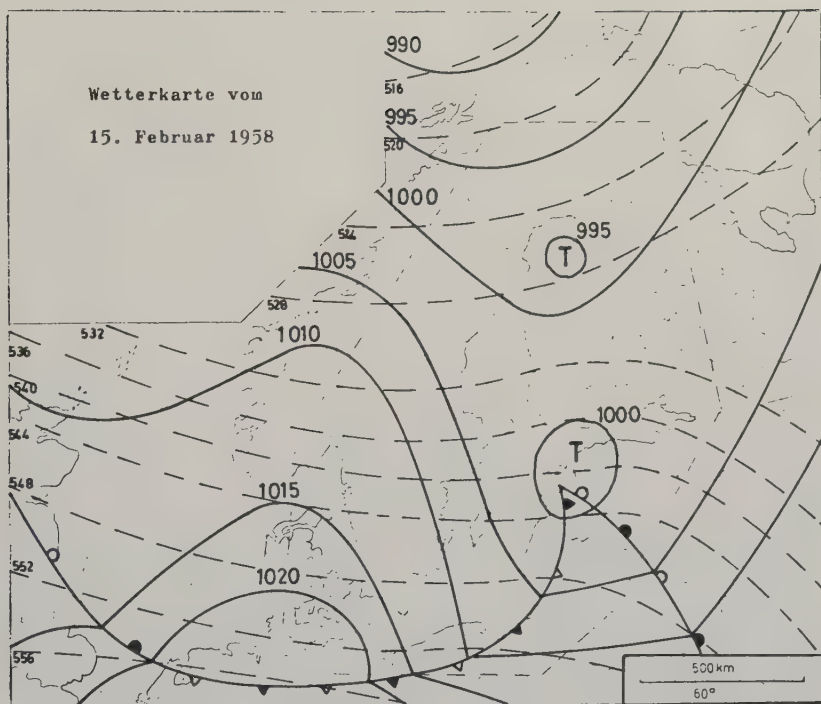


Abb. 7 Warmsektorzyklone

Schauern und Böen begleitet ist.

Da sich die Warmfront vor allem in den unteren Schichten langsamer fortbewegt als die nachfolgende Kaltfront, wird sie von dieser bald eingeholt, und die Zyklone beginnt zu okkludieren. Einen solchen Fall zeigt das folgende Beispiel (S. 32), in dem ein Okklusionstief, das am Vortag über Schottland lag, sich ohne Vertiefung nach Südschweden verlagerte und in seinem Kern zu okkludieren beginnt. Trotz der Okklusion hat sich kein eigenes Höhentief ausgebildet, sondern die Höhenströmung ist nur in geringem Maße beeinflusst worden, da der zyklonale Schwerpunkt bei der Zentralzyklone über der Kola-Halbinsel liegt. - Die Wettererscheinungen eines Okklusionstiefs gleichen im noch offenen Warmsektor denen einer Warmsektorzyklone, während nördlich des Kerns im Bereich der Okklusion aus der

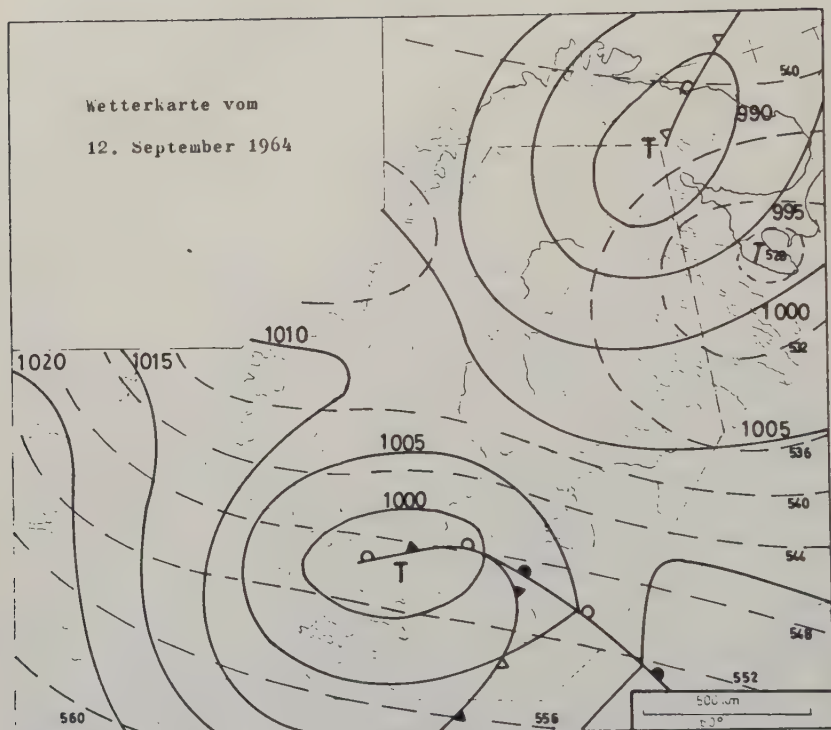


Abb. 8 Okklusionstief

abgehobenen Warmluft verbreitet Niederschläge fallen. - Während Warmsektorzyklonen vornehmlich aus südwestlichen Richtungen das Ostseegebiet erreichen, sind die Okklusionstiefs mehr für die nordwestlichen Herkunftsrichtungen typisch.

Bei den Kaltfronttiefs verläuft die Höhenströmung nicht parallel, sondern senkrecht zur Kaltfront, so daß die frontrechtwinklige Bewegungskomponente des Tiefs größer ist als die frontparallele. Bei der vorherrschenden westlichen Strömung erfolgt daher ihre Hauptbewegungsrichtung von West nach Ost. Ihre Entstehung wird oft durch die topographischen Gegebenheiten der Erdoberfläche begünstigt, wobei besonders das Skagerrak und die Bottenwiek als zyklonenetische Gebiete hervortreten. Durch die Verwirbelung wird die Kaltfront im Nordteil

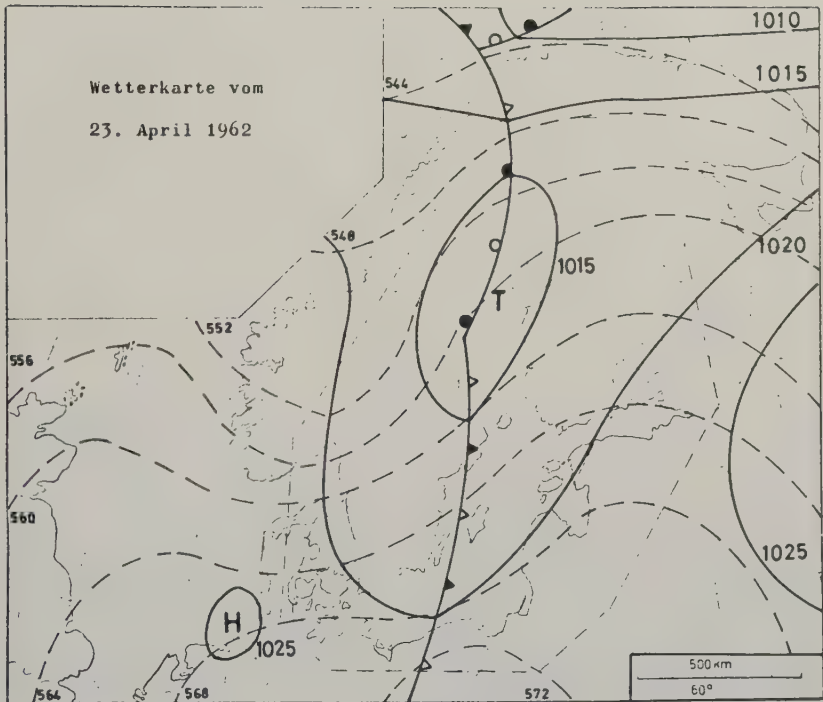


Abb. 9 Kaltfronttief

des Tiefs als Warmfront rückläufig, so daß es durch Aufgleitvorgänge zu geschlossener Bewölkung und räumlich engbegrenzten Niederschlägen kommt.

Bei einem Vorstoß polarer Kaltluft sind in den Luftmassen häufig sekundäre Kaltluftstaffeln eingelagert, an denen sich oft Staffeltiefs ausbilden. Da die Kaltluftproduktion am Pol im Frühjahr ihr Maximum erreicht, treten Staffeltiefs auch vornehmlich in dieser Jahreszeit auf. Für den Kernbereich dieses Typs sind im Gegensatz zum Kaltfronttief Schauerniederschläge typisch, während es hinter der begleitenden Kaltluftstaffel zu kräftigen Temperaturrückgängen kommt. Als Beispiel wurde die Wetterlage vom 6.- 9. April 1958 gewählt. Ein ungewöhnlich kräftiges Polarhoch in Verbindung mit einem Hochkeil

über Grönland ist die Ursache für eine seit dem 6. April anhaltende Nordströmung. Aus dem Kältegebiet bei Spitzbergen wird mit der kräftigen Höhenströmung (60 Ktn. über dem Nordmeer) auf der Trogrückseite in mehreren Staffeln Polarluft nach Südsüdosten gesteuert. An diesen Kaltluftstaffeln bilden sich über den Lofot-Inseln am 7. und 8. April Staffeltiefs, von denen das zweite am 9. über dem Skagerrak liegt, während sich das erste über Mitteldeutschland in Auflösung befindet.

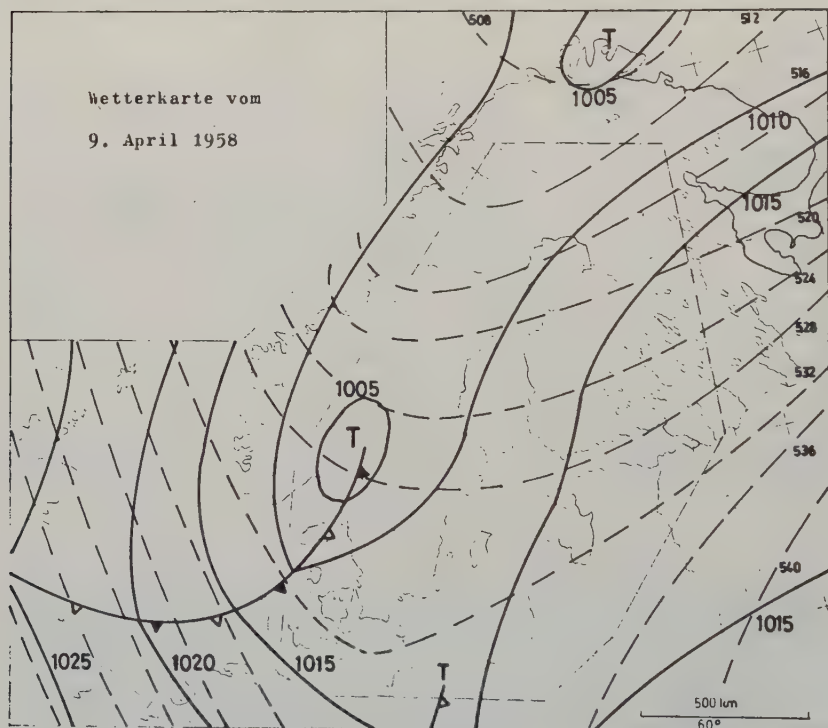


Abb. 1o Staffeltief

Echte Warmfrontwellen bilden sich nur auf der Vorderseite von atlantischen Zentralzyklonen; ihre Herkunft ist daher auf die südwestlichen Richtungen beschränkt. Da hinter ihnen kein nennenswerter Kaltlufteinbruch erfolgt, fehlt ihnen das für Kaltfrontzyklonen typische Rückseitenwetter. Ihr Schlechtwettergebiet ist eng begrenzt und wegen der erhöhten Wanderungsgeschwindigkeit nur kurzfristig wirksam. Nach ihrem Durchzug

herrscht, bedingt durch raschen Druckanstieg, wieder wolkenfreies und warmes Wetter.

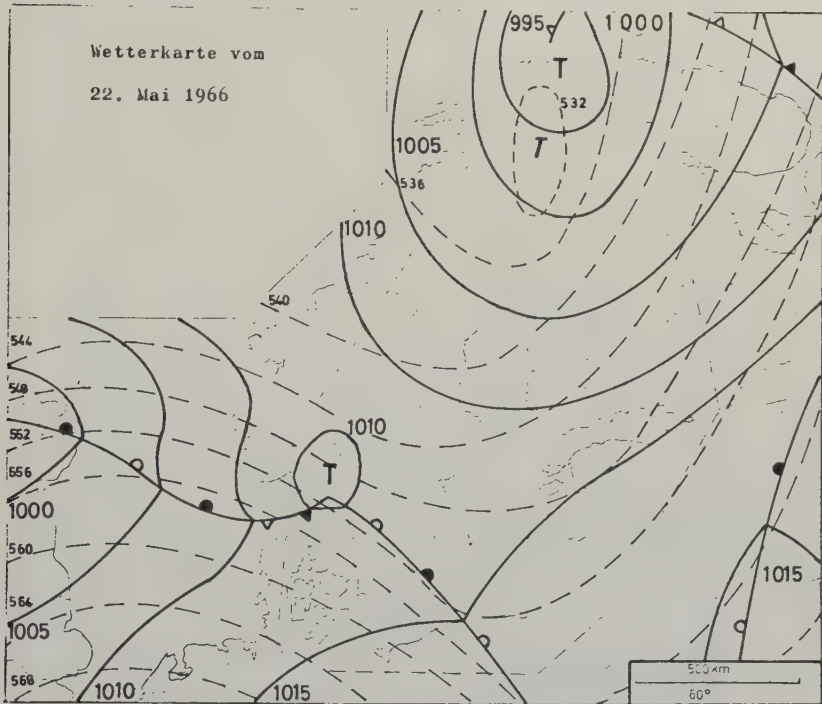
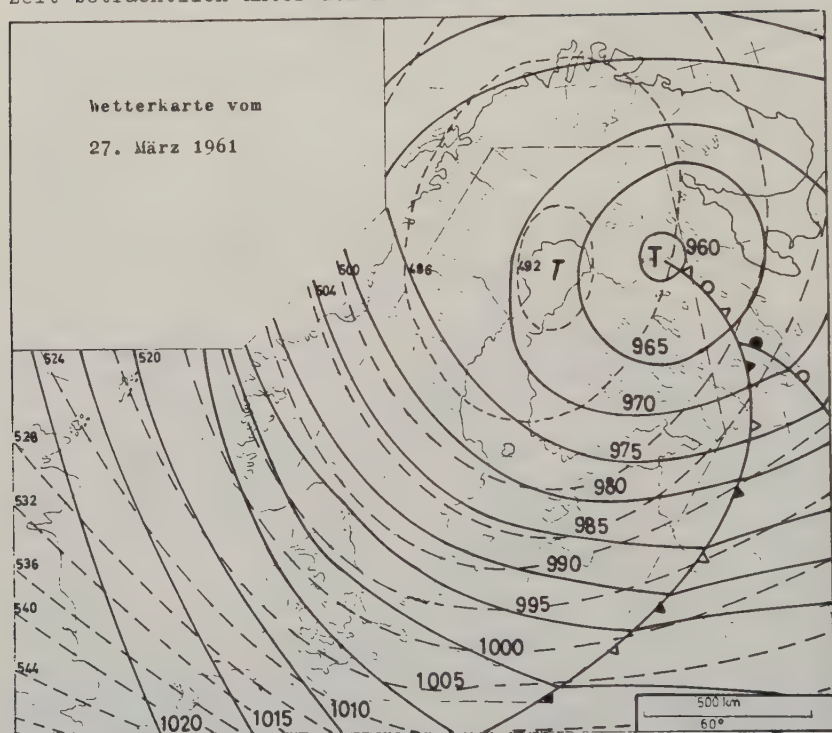


Abb. 11 Warmfrontwelle

Im Gegensatz zum Okklusionstief hat sich bei der Zentralzyklone die zyklonale Rotation bis in die 500 mb-Fläche und höher durchgesetzt, so daß ein hochreichender Wirbel mit nahezu senkrechter Achse entstanden ist. Der Bodendruck liegt in der Regel um 20 und mehr Millibar unter dem der ungestörten Umgebung - Abb. 12 (S. 36) zeigt eine besonders tiefe Zentralzyklone, so daß das Tief durch ein System geschlossener Isobaren mit erheblichen Gradienten repräsentiert wird. Während am Rande, wo die Fronten noch nicht okkludiert sind, die Wettererscheinungen der entsprechenden Frontenart vorherrschen, kommt es im okkludierten Kern zu verbreiteten Niederschlägen, die wegen der geringen Wanderungsgeschwindigkeit der Zentralzyklonen lange anhalten können. Die Temperaturen liegen in der warmen Jahres-

zeit beträchtlich unter dem Mittelwert.



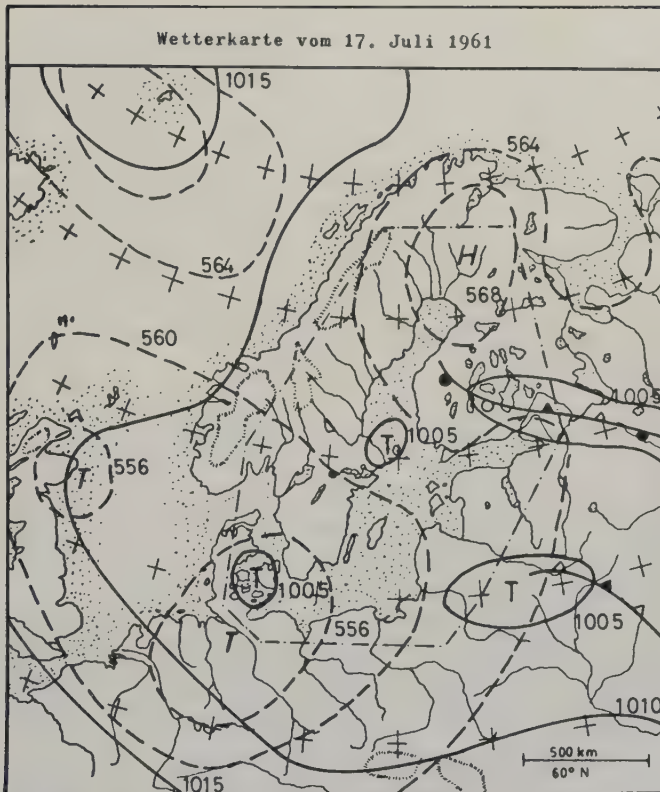


Abb. 13 Kaltes Tief

aber beim Kalten Tief um ein von unten nach oben absterbendes Druckgebilde handelt, ist die Deszendierende Zyklone eine junge, aktive Zyklone, die sich zuerst in der Höhe bildet und dann bis zum Bodendruckfeld durchsetzt. Die Wettererscheinungen mit heftigen Schauerniederschlägen im Kern und einem größeren Temperaturrückgang hinter der Kaltfront sind denen eines Staffeltiefs ähnlich, nur sind sie bei der Deszendierenden Zyklone ungleich viel stärker ausgeprägt. - Als Beispiel wurde die Wetterlage vom 28. Juni 1960 gewählt (Abb. 14, S. 38), bei der die Bildung einer Deszendierenden Zyklone sehr anschaulich zu verfolgen ist. (Leider kann der abgebildete Kartenausschnitt Anlaß zur Verwirrung geben, da er noch ein zweites Druckgebilde über dem Finnischen und Rigaer Meerbusen zeigt. Deshalb sei

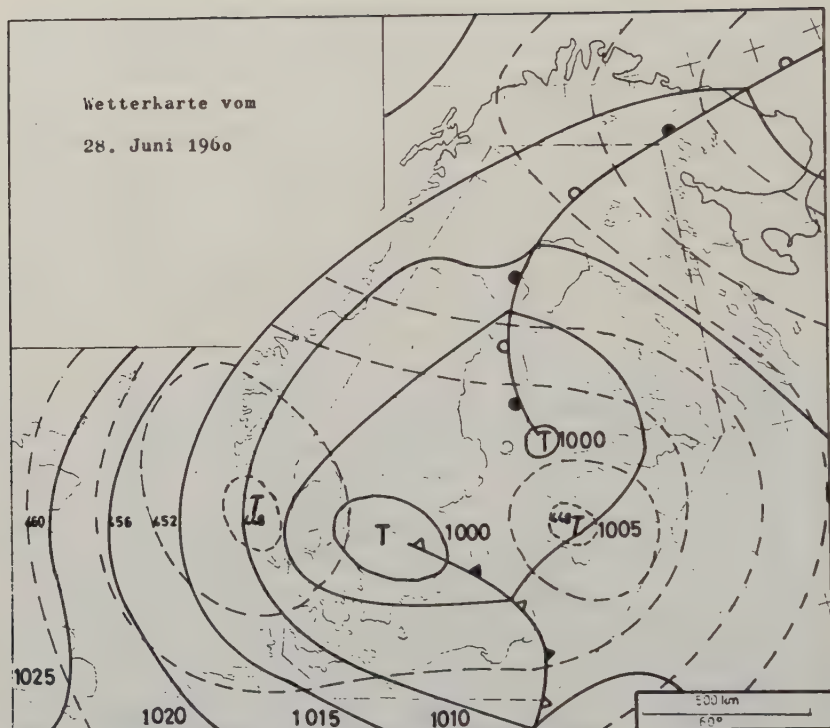


Abb. 14 Deszendierende Zyklone

darauf hingewiesen, daß diese Reste eines russischen Kaltlufttropfens nichts mit der Deszendierenden Zyklone über dem Skagerrak zu tun haben, die von Nordwesten her das Ostseegebiet erreicht). - Westlich von Irland befindet sich am 27. Juni ein dynamisches Hoch, das durch den Warmluftstrom einer Zyklone nördlich der Azoren noch verstärkt wird. Über Island liegt zwischen der 700 und 200 mb-Fläche ein Kaltlufttropfen. Besondere Druckfalltendenzen, die auf die kommende Entwicklung hindeuten könnten, sind nicht zu erkennen. Am 28. hat sich das ostatlantische Hoch am Boden und in der Höhe weiter nach Norden bis in die Dänemarkstraße ausgedehnt. Dadurch wird die über Island anstehende Kaltluft nach Südosten in Bewegung gesetzt. Über der Nordsee schrumpft die relative Topographie um 24 gdm, was einem Temperaturrückgang von $12-14^{\circ}$ entspricht. In dieser Kaltluftmasse bildet sich jetzt überraschend eine Deszendierende

Zyklone, die vom Boden bis in die Stratosphäre reicht. Hinter der Kaltfront einfließende marin-polare Kaltluft bewirkt über Norddeutschland einen Temperaturrückgang von über 10° gegenüber dem Vortage.

Mit der Deszendierenden Zyklone ist die Reihe der am Boden erkennbaren Tiefdruckgebiete abgeschlossen. Die folgenden drei Abbildungen zeigen Kaltlufttropfen verschiedener Intensität. Zusätzlich zu den wie bisher gestrichelt gezeichneten Isohypsen der absoluten Topographie 500 mb wird auch die relative Topographie 500/1000 mb (durch eine gepunktete Linie) dargestellt, um die Mächtigkeit des Kaltluftkörpers deutlich zu machen.

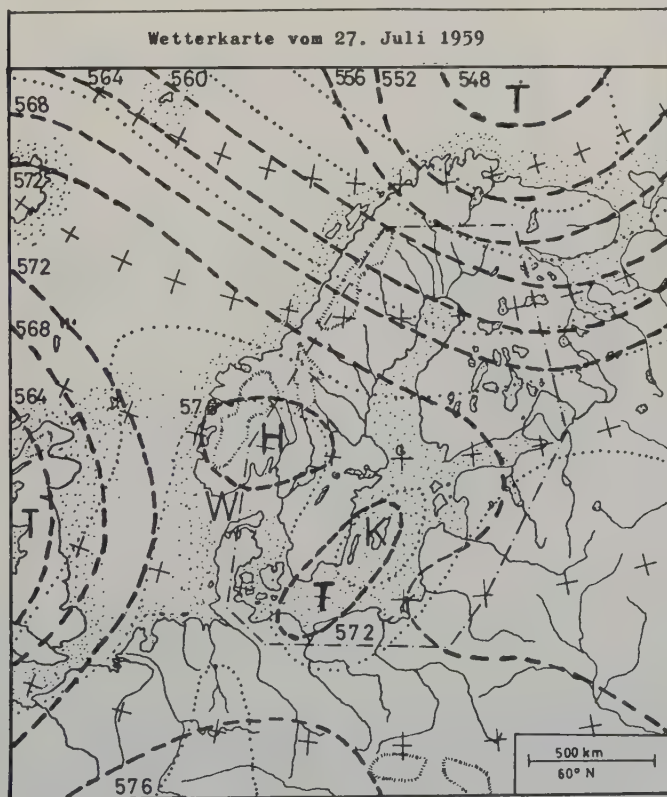


Abb. 15 Schwacher Kaltlufttropfen bei flacher Höhendruckverteilung

Da der Kaltluftkörper nur eine geringe Mächtigkeit aufweist, erschöpft sich die Wetterwirksamkeit eines schwachen Tropfens

bei flacher Druckverteilung in stärkerer Bewölkung.

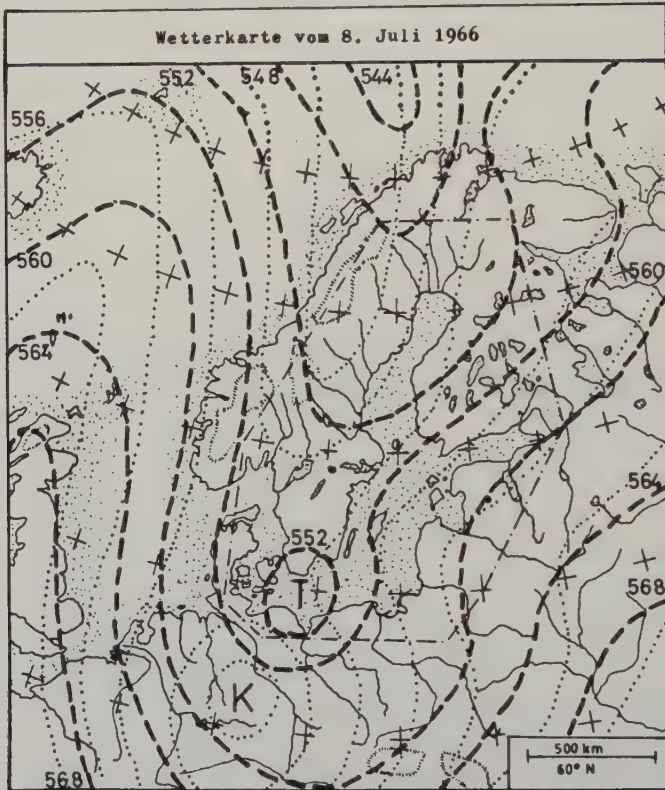


Abb. 16 Schwacher Kaltlufttropfen in
einem symmetrischen Höhentrog

Der schwache Tropfen in einem symmetrischen Höhentrog entspricht in seinen Auswirkungen auf das Wetter einem Kaltfrontdurchgang mit kurzfristiger Abkühlung und Schauerniederschlägen.

Bei den mittleren bis intensiven Tropfen verlaufen die Auswirkungen auf das Wetter parallel zur Intensität der Tropfen und reichen von sehr geringer Wetterwirksamkeit bis zu starker zyklonaler Beeinflussung. Dabei herrschen im allgemeinen auf der Vorderseite konvektive Vorgänge mit Quellbewölkung, Schauerniederschlägen und zwischengeschalteten Aufheitzonen vor, während es auf der Rückseite bei vorwiegend stabilen Hebungs- und Gleitvorgängen zu geschlossener Bewölkung und

Aufgleitniederschlägen kommt. "Dabei ist der Grad der Bedeckung jahreszeitlich noch verschieden. Bei sommerlichen Tropfen ist eine allgemein mächtigere Bewölkung mit Dauerniederschlägen, bei Wintertropfen flachere Bewölkung mit größeren Aufheiterungsgebieten und geringem Niederschlag zu verzeichnen" (H.JCHN 1953, S. 220).

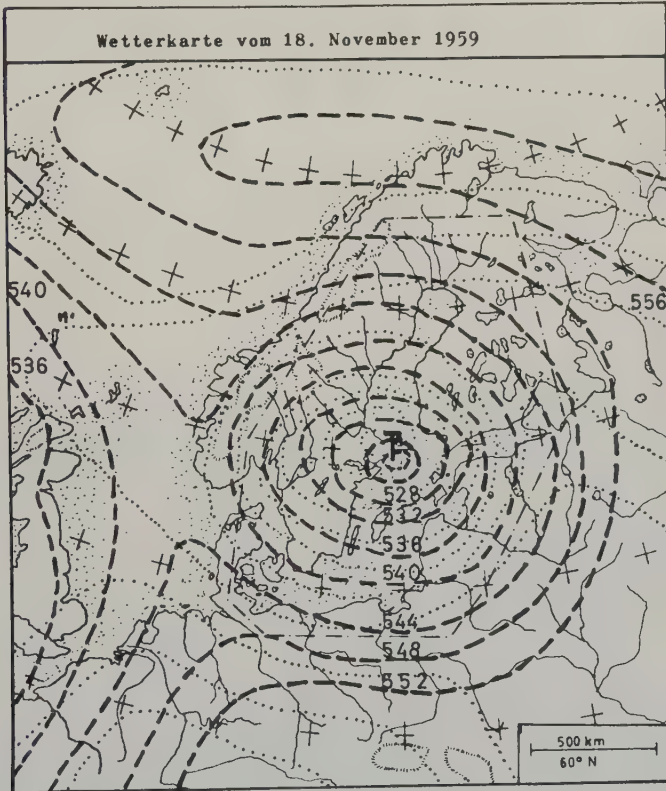


Abb. 17 Intensiver Kaltlufttropfen

Die Abbildung 17 zeigt einen sehr intensiven Kaltlufttropfen, dessen Entwicklung auf Seite 213 im Einzelnen besprochen wird.

C. Die quasistationären Bodenzykklonen

Zu den Tiefdruckgebieten dieser Art gehören vornehmlich die quasifrontenlosen Bodenzykklonen, die entweder nur zu einem Termin sichtbar sind oder die bei längerer Lebensdauer (maximal drei Termine) ihre Lage nicht wesentlich verändern. Geht die Lebensdauer über 24 Stunden hinaus, was bei den flachen Thermischen Tiefs gelegentlich eintritt, so ist damit auch immer eine größere Ortsverlagerung verbunden, so daß diese Fälle zu den wandernden Zyklonen gerechnet worden sind. - Zu den quasistationären Bodenzykklonen gehören aber nicht nur die quasifrontenlosen Bodenzykklonen, sondern auch verschiedene Typen der Frontalzyklonen, soweit sie nur zu einem Termin eine geschlossene Isobare aufweisen. Da für sie eine Bahnbestimmung nicht möglich ist, werden sie auch in diesem Kapitel in einem gesonderten Abschnitt behandelt.

1. Thermische Tiefs

Von allen Tiefdruckgebieten der quasistationären Bodenzykklonen erreichen die Thermischen Tiefs mit 114 Fällen die größte Häufigkeit. Vom Tiefdrucktyp her gesehen ist ihre Zahl sogar noch etwas höher (Vgl. S. 25), aber da 14 Fälle länger als 24 Stunden bestanden, wurden sie zu den bahnbildenden Zyklonen gerechnet.

Tabelle 3: Jahreszeitliche Verteilung der Thermischen Tiefs

Frühling	Sommer	Herbst	Winter	Jahr
30	46	17	21	114

Bei der Tabelle 3 fällt sofort das Sommermaximum ins Auge. Die Zahl der Fälle ist in den wärmsten Monaten Juni und Juli am größten (Vgl. Diagr. 1), denn die im Herkunftsgebiet noch wenig erwärmte arktische Polarluft erfährt dann durch die Unterlage die stärkste Labilisierung. Diese Abhängigkeit von der einstrahlungsbedingten Erwärmung des Festlandes kommt auch deutlich durch die räumliche Verteilung der Positionen zum Ausdruck, denn im Sommer ist die Ostsee fast frei von flachen Thermischen Tiefs (Vgl. Abb. 18, S. 44). Auffällig ist allerdings die Häufung der Tiefs im Skagerrak, die man hier eher im Herbst vermuten würde. Obwohl auch bei diesen Bildungen über dem Wasser an Hand der Monatsmittelkarten für die Oberflächentemperatur

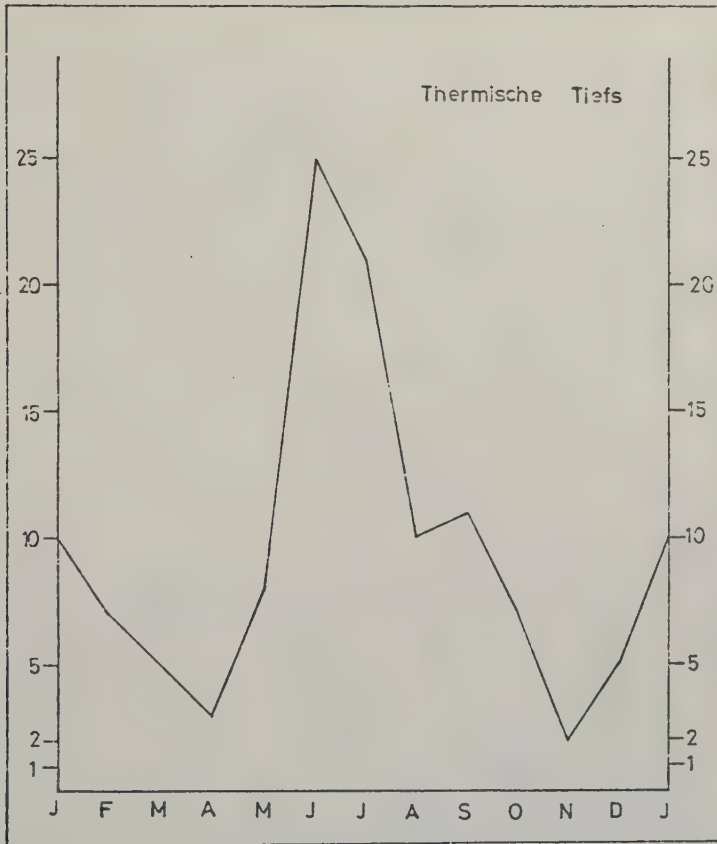


Diagramm 1 Jahrgang der Thermischen Tiefs

der Ostsee von G.BÖHNECKE und G.DIETRICH (1951) immer eine Temperaturdifferenz zwischen Wasser und Luft festgestellt werden konnte, ist diese doch so gering, daß sie schwerlich ausreichen kann, um die Tiefdruckgebiete über zwei oder mehr Termine bestehen zu lassen. Für ihre Erhaltung müssen also noch spezielle Strömungssituationen eine bestimmte Rolle spielen. Trotzdem wurden auch diese Druckgebilde zu den Thermischen Tiefs gezählt, da sie immer mit einem Höhentrog und einer Kaltluftzunge gekoppelt sind, während die Leetiefs, zu denen man sie sonst zählen müßte, überwiegend auf Grund der Strömungssituation entstehen.

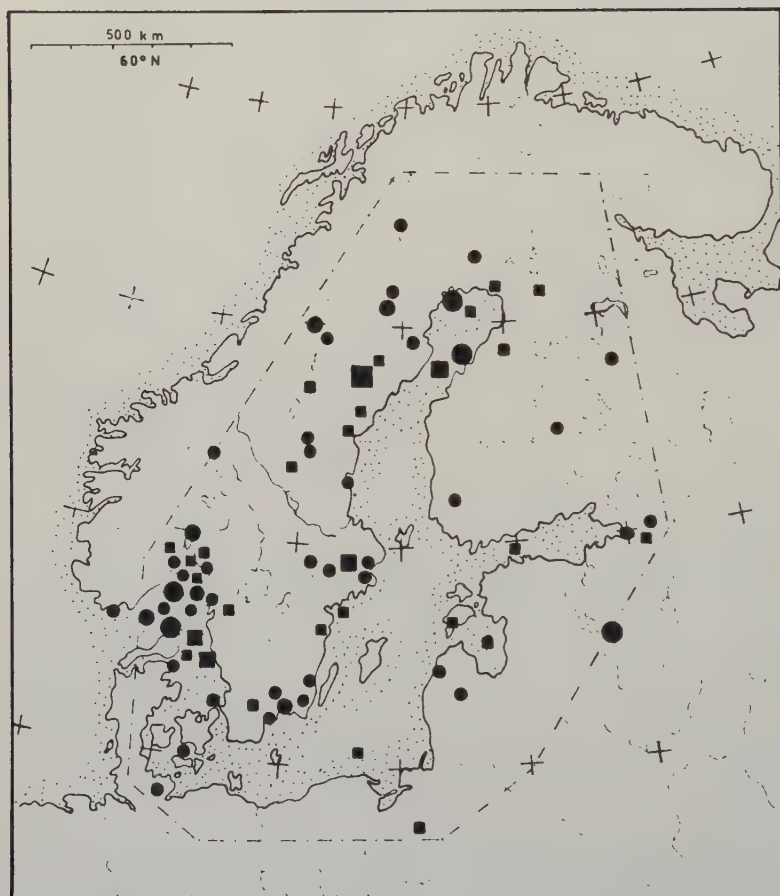


Abb. 18

Thermische Tiefs

	sichtbar zu			
	1	2	3	Terminen
Frühling	■	■	■	
Sommer	●	●	●	

Während die Thermischen Tiefs über dem Wasser im Sommer ziemlich wetterunwirksam sind und sich oft nur durch zyklonal umlaufende Winde bemerkbar machen, ist die Wetterwirksamkeit der Tiefs über dem Festland, die sich unter Kaltluftinseln oder -zungen bilden, oft beträchtlich. Meist kommt es infolge der erhöhten Konvektionsbereitschaft zu Gewittern, und fast immer treten Schauerniederschläge auf. Diese Wettererscheinungen zeigen sich dagegen nur selten bei den Thermischen Tiefs, die sich unter Hochdruckeinfluß allein durch die Erhitzung des Festlandes bilden. Wegen des überlagernden höheren Drucks kommt es nur zuweilen zu Schauern.

Von August bis November nimmt die Zahl der Fälle fast kontinuierlich ab, weil die einströmende Kaltluft nicht mehr so tiefe Temperaturen aufweist. Da das Festland schneller abkühlt als das Meer, verlagert sich der größte Temperaturgegensatz zwischen Luftmasse und Unterlage zu Beginn des Herbstes immer mehr auf die offenen Wasserflächen der Ostsee, wo die Zahl der längerlebigen Tiefs jetzt relativ hoch ist (Vgl. Abb. 19, S. 46). Das Minimum des Auftretens, das erstaunlicherweise in den November fällt (Vgl. Diagr. 1, S. 43), kann nicht durch eine falsche Tiefdruckklassifizierung bedingt sein, denn in allen 10 Novembermonaten treten überhaupt nur 2 frontenlose Bodenzyclonen auf; insofern ist es reell. Andererseits treten nach der weiter unten zu besprechenden Untersuchung von R. SOLANTIE (1966) gerade im Herbst viele flache Thermische Tiefs auf, die aber bei nur geringen Druckänderungen durch die zeitlich recht weit auseinanderliegenden deutschen Wetterkarten, in denen zudem die Isobaren nur im Abstand von 5 mb gezeichnet sind, nicht erfaßt werden. Insofern ist das Minimum nicht reell, sondern beruht nur auf der Art der verwendeten Wetterkarten.

Erst im Dezember steigt die Kurve der Häufigkeiten wieder steil an und erreicht im Januar ein sekundäres Maximum. Die Vergrößerung der vertikalen Temperaturdifferenz, die darin zum Ausdruck kommt, wird jetzt nicht wie im Sommer durch die zunehmende Erwärmung der Unterlage (Festland), sondern durch die Zufuhr immer kälterer Luftmassen verursacht. Die Extremwerte reichen jetzt tiefer hinab und erreichen besonders im Skagerrak mit seinen druckfallbegünstigenden Strömungsverhältnissen Werte von 985 mb. Entsprechend stärker sind auch die Wettererscheinungen ausgeprägt, die sich nicht nur in einer Zunahme der Windstärke,



Abb. 19

Thermische Tiefs

	sichtbar zu			Terminen
	1	2	3	
Herbst	■	■	■	
Winter	●	●	●	

sondern auch in heftigen Schneeschauern bemerkbar machen. Auch die Tiefbildungen in den übrigen Gebieten sind in der kalten Jahreszeit von Schneeschauern begleitet. Bei den längerlebigen Tiefs tritt sogar oft noch eine Vertiefung um 5 mb und mehr ein. Ein spezieller Fall dieser Art, der im Bottnischen Meerbusen auftrat und von R.SOLANTIE (1968) untersucht worden ist, soll im Folgenden exemplarisch etwas ausführlicher dargestellt werden, da den Thermischen Tiefs der nördlichen Ostsee über die momentane Witterungsbeeinflussung hinaus auch eine klimatologische Bedeutung zukommt.

Die Tiefbildung wurde eingeleitet durch die kalte Rückseitenströmung einer großen Zentralzyklone, die vom 8. bis 12. Dezember ihren Weg über Dänemark, das Baltikum und Karelien zur Barentssee nahm. Abb. 20 (S.48) zeigt die synoptische Situation während des kräftigsten Kaltluftausbruchs. Das Tiefzentrum befindet sich über dem Ladogasee, und in der einströmenden Kaltluft kommt es zu verbreiteten Schneefällen. Die Lufttemperatur, die an der schwedischen Ostküste zwischen -6° und -11° liegt, ist an der finnischen Küste um 5° geringer und nimmt infolge des erwärmenden Einflusses der Ostsee an beiden Küsten nach Süden hin zu.

Obwohl die Wärmeabgabe infolge des großen Temperaturunterschiedes zwischen dem warmen Wasser und der extrem kalten Arktikluft am 10. Dezember mit $216 \text{ cal/cm}^2/6 \text{ h}$ ihren größten Wert erreicht, kann sich die Erwärmung nicht in größere Höhen durchsetzen, da infolge des heftigen Nordostwindes die warme Luft sofort abtransportiert wird (Vgl. Diag. 2, S. 49). Nur in einer ganz flachen Schicht erfolgt eine Aufheizung, so daß an der schwedischen Ostküste aus einem steilen Druckgradienten höhere Windgeschwindigkeiten resultieren (NO, 50 Ktn.).

Auch am 11. Dezember besteht diese Situation noch fort, und erst am 12. , als die Zentralzyklone die Barentssee erreicht hat und die Kaltluft über der Bottensee zur Ruhe kommt, setzt sich die Erwärmung bis ins 700 mb-Niveau durch. Infolge des dadurch ausgelösten Druckfalls bildet sich am 12. Dezember ein flaches Thermisches Tief über der Bottenwiek (Vgl. Abb. 21, S. 48). Durch die zyklonale Zirkulation erfolgt eine intensive Warmluftadvektion gegen den Nordteil der finnischen Küste, so daß die Temperaturen innerhalb der erwärmten Meeresluft kräftig ansteigen (von -15° am 10. Dezember auf -4° am 12. Dezember. Auch über

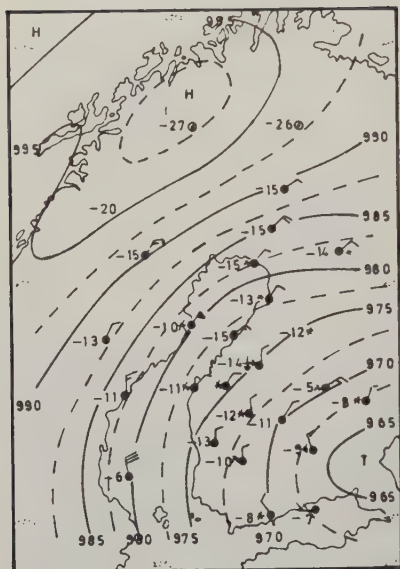


Abb. 20 Wetterkarte vom
10. Dezember 1957, 5 Uhr

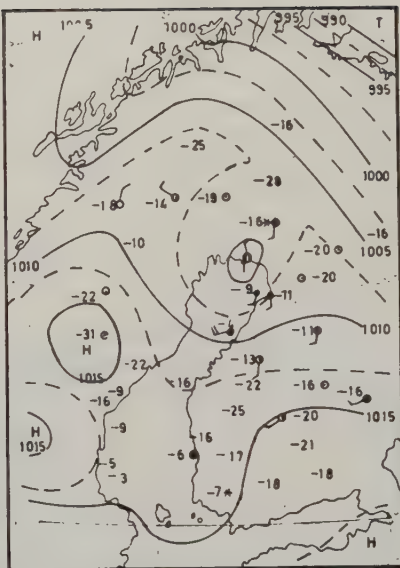


Abb. 21 Wetterkarte vom
12. Dezember 1957, 5 Uhr

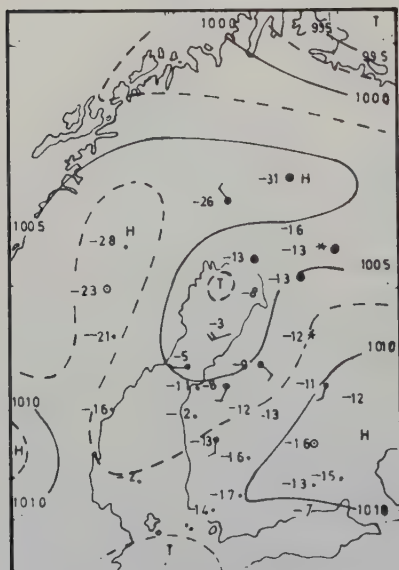


Abb. 22 Wetterkarte vom
13. Dezember 1957, 5 Uhr

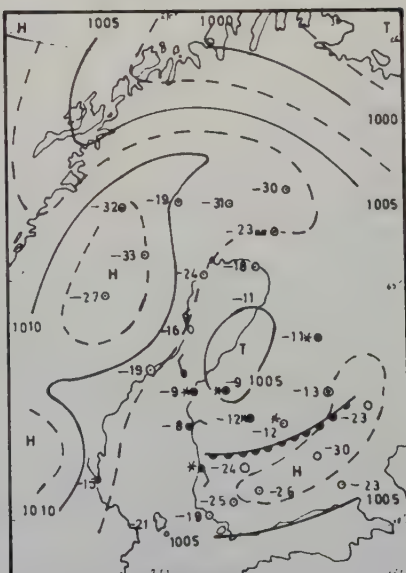


Abb. 23 Wetterkarte vom
14. Dezember 1957, 5 Uhr

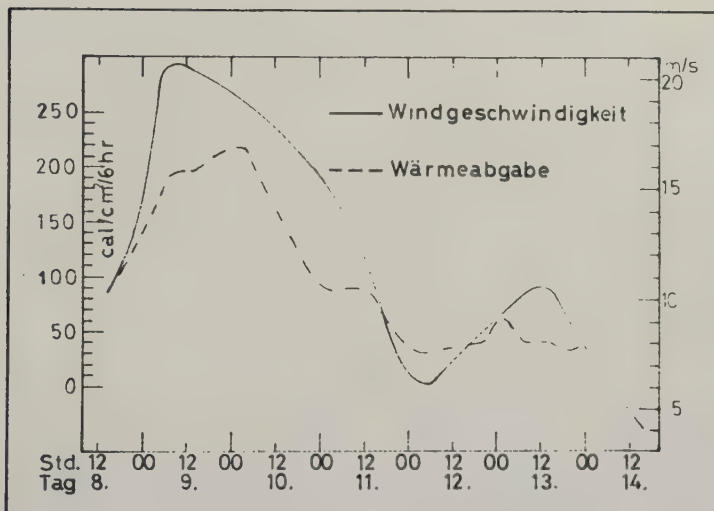


Diagramm 2 Windgeschwindigkeit und Wärmeabgabe bei
Ulkokalla zwischen dem 8. und 14. Dezember 1957
zusammengestellt nach R.SOLANTIE 1968, S. 14.

Südwestfinnland stellt sich eine südliche Strömung ein, wobei es in der Maritimluft zu Schneefällen kommt.

Da sich der Druckfall über dem Wasser fortsetzt, erreicht das Tief am 13. Dezember mit 1002,5 mb seine größte Intensität (Vgl. Abb. 22). Dadurch nimmt die Windgeschwindigkeit in Ulkokalla, die am 12. Dezember auf 6 m/sec abgesunken war, wieder merklich zu (Vgl. Diag. 2). Durch zwei weitere Tiefs, die sich inzwischen über der mittleren Ostsee und dem Weißen Meer gebildet haben, entsteht eine langgezogene Tiefdruckrinne, an deren Südostseite sich eine Strömung von der Botensee nach Finnland hinein einstellt. Die dadurch verursachte Warmluftadvektion läßt die Temperaturen an einigen Orten in einer Nacht um 10° bis 15° ansteigen. In den nördlichen Teilen der Warmluft kommt es durch Abkühlung zur Kondensation und damit zu Schneefällen.

Am 14. Dezember beginnt sich das Tief, zuerst in seinen nördlichen und westlichen Teilen, langsam aufzufüllen, da die Temperaturdifferenz zwischen Wasser und Luft auf 2° bis 3° abgesunken ist und die Rotationsenergie durch Reibung langsam aufgezehrt wird. Das finnische Hochdruckgebiet wird langsam nach

Süden abgedrängt. Dabei bildet sich zwischen der warmen Meeresluft des Bottnischen Meerbusens und der kalten Kontinentalluft des finnischen Hochs eine scharfe Front mit einer Temperaturdifferenz von 15° aus (Vgl. Abb. 23, S.48). In der Warmluft schneit es, und da die zyklonale Zirkulation fast zum Erliegen gekommen ist, herrscht Windstille. Gegen Mittag klart der Himmel auf und die Luftmasse beginnt auszukühlen.

Um herauszufinden, welche Bedeutung der Ostsee und besonders dem Bottnischen Meerbusen als Wärmequelle in klimatologischer Hinsicht zukommt, hat R.SOLANTIE den Einfluß auf die drei Wetterelemente Druck, Wind und Temperatur untersucht.

Während die Bodendruckverteilung im August auf Grund fehlender Temperaturgegensätze sehr ausgeglichen ist, macht sich im Herbst, wenn die ersten Kaltluftausbrüche auf die Ostsee hinaus erfolgen, schon eine Druckerniedrigung im Mittelwert bemerkbar, die im Dezember und Januar ihre stärkste Ausprägung erfährt, und die im Verlauf des März und Aprils wieder verschwindet. Im Vergleich der beiden Karten von Abb. 24 zeigt sich deutlich der Einfluß der Ostsee. Durch den verhältnismäßig steilen Druckgradienten kommt es über Ostdeutschland und Polen zu einer

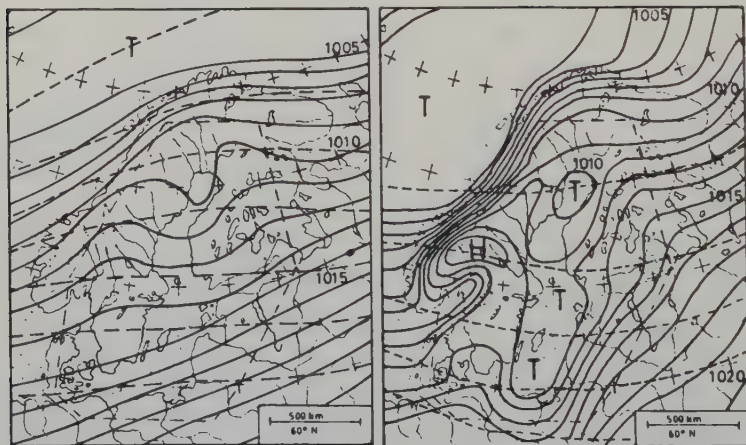


Abb. 24 Mittlere Bodendruckverteilung (1951-1960) und mittlere Topographie des 850 mb-Niveaus (1951-1960) für die Monate Oktober (links) und Januar (rechts) durchgezogene Linien: Bodendruckfeld gestrichelte Linien: Höhendruckfeld

nach R.SOLANTIE 1968, S. 22/23

kräftigen südwestlichen Strömung, die über dem Baltikum und Finnland auf Süd dreht. Entsprechend dieser Druckverteilung verhält sich auch das Auftreten und die Richtung der herbst- und winterlichen Stürme über dem Bottnischen Meerbusen. An der Gesamtzahl haben die Stürme aus N,NW und NO einen Anteil von 80 % an der bottnischen Westküste, von 50 % auf Valassaret (im Kvark) und von 20-30 % an der bottnischen Ostküste, während im Sommer die Häufigkeitsverteilung gerade umgekehrt ist.

Auch im Temperaturfeld macht sich der Einfluß der winterlichen Thermischen Tiefs über der Ostsee bemerkbar, indem durch die landeinwärts gerichtete Warmluftadvektion die Temperaturen in Westfinnland angehoben und die Auswirkungen der scharfen Ostwinde gemildert werden. Beim Vergleich der drei den gleichen kontinentalen Jahresgang der Temperatur aufweisenden Stationen Särna (im zentralen Teil der skandinavischen Halbinsel), Jokioinen (in Südwestfinnland) und Moskau zeigen sich die Einflüsse der warmen Ostsee sehr deutlich in der für Jokioinen deutlich höher liegenden Winterminima.

Zusammenfassend gibt R.SOLANTIE vier Begründungen dafür, daß die genannten Witterungsbeeinflussungen allein von der Ostsee als Wärmequelle und den damit verbundenen Tiefbildungen abhängen:

1. Obwohl die herbst- und winterliche Höhenströmung oberhalb 850 mb rein west-östlich ausgerichtet ist (Vgl. Abb. 24, S.50), bildet sich rechtwinklig zu ihr eine flache Bodenströmung, die von dem flachen Wirbel ausgeht, der in keinem Kausalzusammenhang mit den dynamischen Vorgängen in höheren Niveaus steht.
2. Auch ein Lee-Effekt des skandinavischen Gebirges kommt als Ursache nicht in Frage, da sich der Wirbel über der Ostsee bildet, obwohl Stärke und Richtung der Höhenströmung von September bis Januar unverändert bestehen bleiben.
3. Die positive Temperaturanomalie, der Temperaturunterschied zwischen Wasser und Luft und der Kerndruck der Tiefs weisen alle den gleichen Jahresgang auf: während die Werte im September bei Null liegen, nehmen sie gleichzeitig im Verlauf des Herbstes und des Frühwinters zu.
4. Die Wirbelbildung findet ausschließlich über dem Wasser statt.

Auf Grund dieser von R.SOLANTIE (1968) durchgeführten Untersuchung müßte man ein sehr viel stärkeres Auftreten der

Thermischen Tiefs in der nördlichen Ostsee erwarten, als es die Abb. 19 (S. 46) zeigt. Der Grund für die relativ geringe Zahl der gefundenen Fälle liegt, wie oben schon angedeutet, in der Art der verwendeten Wetterkarten, in denen die Bodenisobaren nur im Abstand von 5 mb gezeichnet werden. Da es sich bei den Druckerniedrigungen der Thermischen Tiefs meistens um relativ geringe Werte handelt - im vorliegenden Fall waren es 6 bis 7 mb - ist eine Erfassung durch die deutschen Wetterkarten mehr oder minder zufällig. Auch der beschriebene Fall ist nur am 14. Dezember in der O^h -Karte verzeichnet, während die geschlossenen 1007,5 mb- bzw. 1002,5 mb-Isobaren des 12. und 13. Dezembers nicht zur Darstellung kommen. Für eine genauere Untersuchung dieser sehr flachen Thermischen Tiefs müßte das Windfeld eingehender beachtet werden, was aber hier nicht durchgeführt wurde, da in dieser Arbeit, wie in Kapitel II.A. 1 schon festgestellt, nur Tiefdruckgebiete behandelt werden, die in der verwendeten Wetterkarte mindestens einmal eine geschlossene Isobare aufweisen.

Entsprechend der fortschreitenden Abkühlung der Ostsee nimmt auch die Zahl der Thermischen Tiefs zum Frühjahr hin immer mehr ab, bis sie im April ein sekundäres Minimum erreichen (Vgl. Diagr. 1, S. 43). Obwohl sich gerade in dieser Jahreszeit die Ausbrüche kalter Arktikluft häufen, ist die Wassertemperatur der Ostsee zu niedrig, als daß sich Thermische Tiefs entwickeln könnten. Erst in den ersten Juniwochen steigt die Zahl der Tiefs, die jetzt alle über dem Festland liegen, wieder stark an.

2. Leetiefs

Bei einer west- bis nordwestlichen Strömung bilden sich auf der Ostseite der Skanden und besonders im Skagerrak flache Tiefdruckgebiete, die zwar in ihrem jahreszeitlichen Auftreten einen gewissen Einfluß der Einstrahlungsverhältnisse widerspiegeln, die aber vorwiegend durch die Strömungs- und Druck-situation bedingt sind. Bei einer rechtwinklig zum Gebirge gerichteten Strömung entsteht auf der Westseite durch Massenstau und thermisch bedingte Druckänderungen ein luvwärtiger Hochkeil, mit dem relativ tiefer Druck auf der Leeseite gekoppelt ist, so daß man auf Grund des Isobarenverlaufs von einem Leetrog sprechen kann. "Dieser kann sich gelegentlich soweit vertiefen, daß

es in ihm zur Entstehung eines abgeschlossenen Wirbels, einem Leetief, kommt" (H.MALBERG 1967, S. 41). Dieser Fall tritt aber bei weitem nicht so häufig ein wie z.B. südlich der Alpen, wo bei Nordströmung ähnliche Verhältnisse herrschen. H.WICK (1966, S. 3) gibt die Zahl der Zyklogenese im Genua-Raum für die zehn Jahre von 1949 bis 1958 mit 297 Fällen an. Für diese hohe Zahl sind neben dem Lee-Effekt aber noch andere Faktoren (Rhônental, Mittelmeer) von maßgeblicher Bedeutung. Die Ausbildung von Leetiefs auf der Ostseite der Skanden ist dagegen verschwindend gering (Vgl. Abb. 25, S. 54). Hier konzentrieren sich die Tiefdruckgebiete im Skagerrak, wo neben dem Lee-Effekt auch noch die horizontale Divergenz, die durch den vorspringenden Pfeiler des südnorwegischen Berglandes verursacht wird, eine Wirbelbildung begünstigt. Dabei kann, entsprechend der Dauer der Strömungsverhältnisse, auch der Wirbel längere Zeit erhalten bleiben. - Im Gegensatz zu den mittelmeerischen Leetiefs sind die skandinavischen Tiefs aber nicht sehr wetterwirksam, da wegen des überlagernden hohen Drucks keine Konvektion zustande kommt und der Kerndruck meist über 1010 mb liegt. Sie weisen damit mehr Ähnlichkeit mit den von G.BAHRENBURG (1968) auf der Nordseite der Alpen gefundenen Leetiefs auf.

Tabelle 4 Jahreszeitliche Verteilung der Leetiefs

Frühling	Sommer	Herbst	Winter	Jahr
14	9	-	-	23

Der Jahresgang der Leetiefs ähnelt mit seinem Gipfel im Mai und Juni stark an die Thermischen Tiefs (Vgl. Diagr. 1, S. 43). Hierin zeigt sich, daß zur Bildung der Leetiefs, deren Entstehungsursachen letztlich noch unklar sind, die Strömungssituation allein wohl nicht ausreicht, sondern daß die Wirkung der

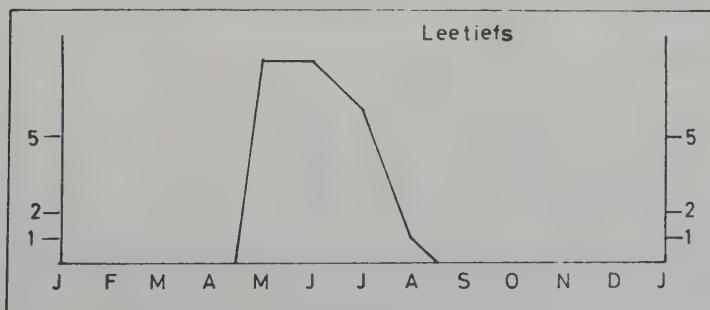


Diagramm 3 Jahresgang der Leetiefs

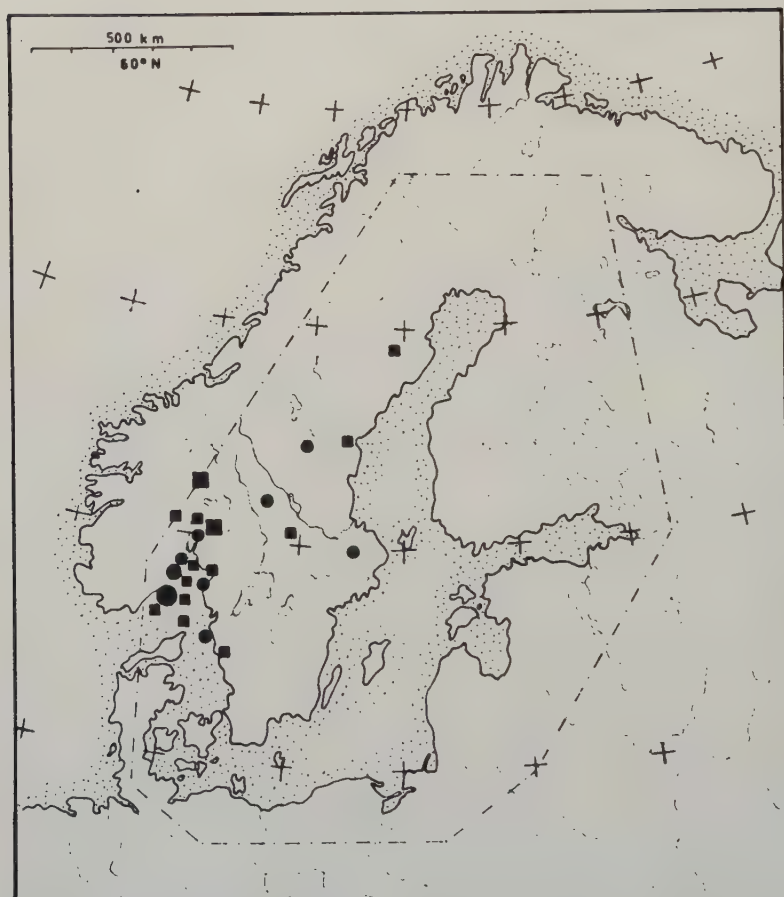


Abb. 25

Leetiefs

sichtbar zu

	1	2	3	Terminen
Frühling	■	■	■	
Sommer	●	●	●	

Insolation wahrscheinlich hier auch eine Rolle spielt. In der kalten Jahreszeit entfällt nicht nur der labilisierende Einfluß des Festlandes, sondern der zähe Kaltluftblock, der dann ostwärts der Skanden lagert, wirkt einer Leewirkung überhaupt entgegen, da die überwiegende Luft erst über der mittleren Ostsee wieder das Bodendruckfeld erreicht (Vgl. J. BLÜTHGEN, 1940).

3. Resonanztiefs

Ebenso wie für die Leettiefs sind auch bei den Resonanztiefs die Skanden eine Voraussetzung ihrer Genese. Waren erstere hauptsächlich an eine rechtwinklig zum Gebirge wehende Höhenströmung gebunden, so treten Resonanztiefs nur in Verbindung mit kräftigen Nordmeerzyklonen auf. Sobald diese nach Nordosten ziehenden Muttertiefs sich zwischen den Lofot-Inseln und dem Nordkap befinden, weiten sich die Bodenscharen immer weiter nach Osten aus, bis sich schließlich im Ostseeraum ein eigenes abgeschlossenes Tief ausbildet. Die Genese ist also offenbar an die speziellen räumlichen Gegebenheiten des nördlichen Ostseeraumes gebunden; deshalb konzentrieren sich die Tiefs über Nordschweden und der Bottenwiek (Vgl. Abb. 26, S. 56). Offensichtlich müssen aber ganz spezielle synoptische und dynamische Situationen, deren Untersuchung nicht Aufgabe dieser Arbeit sein kann, zusammenwirken, bevor es zu Resonanzbildungen kommt, denn die Zahl von nur 18 Fällen ist im Verhältnis zur Zahl der kräftigen Zyklonen über dem Nordmeer verschwindend gering.

Tabelle 5 Jahreszeitliche Verteilung der Resonanztiefs

Frühling	Sommer	Herbst	Winter	Jahr
5	4	4	5	18

Der Einfluß der Unterlage, der bei der Genese der anderen quasi-frontenlosen Bodenzyklonen immer eine größere Rolle spielte, ist bei den Resonanztiefs relativ klein, denn sie weisen den ausge-

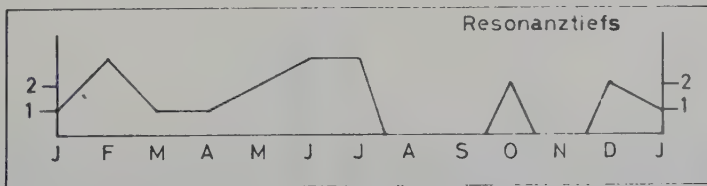


Diagramm 4 Jahresgang der Resonanztiefs

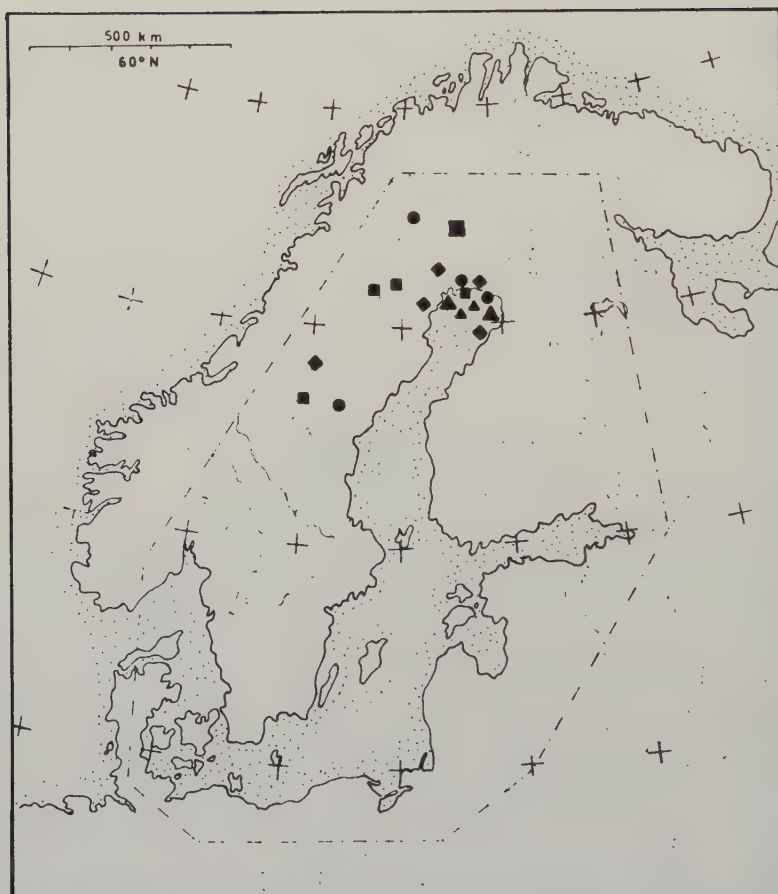


Abb. 26

Resonanztiefs

	sichtbar zu			
	1	2	3	Terminen
Frühling	■	■	■	
Sommer	●	●	●	
Herbst	▲	▲	▲	
Winter	◆	◆	◆	

glichensten Jahresgang auf (Vgl. Diagramm 4, S. 55). Im Herbst und Winter scheint zwar die Bottenwiek ein bevorzugtes Gebiet zu sein, aber die primäre Ursache der Entstehung kann keinesfalls im Einfluß der Unterlage gesehen werden, denn die tiefen Kern-drücke, die diese Tiefs aufweisen, können nur in Verbindung mit einem Zentraltief entstehen. Der durchschnittliche Druck liegt mit 995 mb am niedrigsten von allen quasifrontenlosen Boden-zyklonen, und die Extremwerte reichen im Herbst sogar bis auf 970 mb hinab, woran das wärmere Ostseewasser vielleicht noch verstärkend beteiligt ist. Entsprechend ausgeprägt sind auch die Wettererscheinungen im Herbst und Winter, in denen sich ein größeres Schneefallgebiet über Nordfinnland erstreckt, wenn durch die Resonanztiefs in der Bottenwiek feuchte Ostseeluft auf ihrer Südostseite herumgeholt wird. Im späten Frühjahr und im Sommer kommt es dagegen auf dem Festland häufig zu Schauerniederschlägen und Gewittern. Im Einzelfall ist es aber immer schwierig zu entscheiden, ob das Resonanztief selbst oder nicht vielmehr die Mutterzyklone die entscheidende Ursache der Wettererscheinungen ist.

4. Frontaltiefs

Als letzte Untergruppe der quasistationären Bodenzyklonen müssen noch die Druckgebilde erwähnt werden, die sich an Fronten oder frontenähnlichen Grenzflächen bilden und die nur kurzfristig sichtbar sind. Bei diesen Tiefs, die unter dem Sammelbegriff "Frontaltiefs" zusammengefaßt wurden und die zahlenmäßig mit 90 Fällen hinter den Thermischen Tiefs an zweiter Stelle stehen, handelt es sich um Teiltiefbildungen an Kaltfronten (Vgl. Abb. 9, S. 33) und an Kaltluftstaffeln (Vgl. Abb. 10, S. 34). Bei den hier ebenfalls auftretenden Warmfrontwellen handelt es sich nicht eigentlich um Wellen, sondern um kurzfristig sichtbare Tiefbildungen an Warmfronten, für die aber wegen der geringen Zahl kein eigener Typ gebildet wurde. Eine ähnliche Abweichung von der oben gegebenen Typisierung ergibt sich bei den hier auftretenden Okklusionstiefs, bei denen es sich hier nur um kurzfristige Tiefbildungen am Okklusionspunkt handelt.

Von diesen vier Typen ist es den letzten dreien gemeinsam, daß es sich bei ihnen nur schwer feststellen läßt, ob die sie begleitenden Niederschläge und Temperaturänderungen von ihnen

selbst oder von der sie begleitenden Frontenart ausgehen. Trotzdem wurde bei der Darstellung eine Trennung in vier verschiedene Typen beibehalten, da durch sie die begleitende Frontenart festgelegt ist und somit mittelbar auf die witterungsmäßige Beeinflussung des Ostseeraumes, die von diesen Fronten ausgeht, geschlossen werden kann.

Tabelle 6 Jahreszeitliche Verteilung der Frontaltiefs

	Frühling	Sommer	Herbst	Winter	Jahr
Kaltfronttief	20	15	11	9	55
Staffeltief	4	1	1	2	8
Warmfrontwelle	4	-	1	9	14
Okklusionstief	2	2	2	7	13
Summe	30	18	15	27	90

Der einzige Typ, der, wenn auch nur auf engstem Raum, eigenständige Wettererscheinungen bedingt, ist das Kaltfronttief. Durch die kurzfristige Verwirbelung wird die Kaltfront nördlich des Tiefs rückläufig, so daß es zu Aufgleitniederschlägen kommt, die aber nicht lange anhalten, da zum nächsten Termin meist der gradlinige Verlauf der Front wiederhergestellt ist. Als Ursache für die Verwirbelung kommt neben der Labilität, die einer Kaltfront ohnehin innewohnt, auch ein topographischer Einfluß, besonders für das Skagerrak, in Betracht. Bei einer West-Ost ziehenden Kaltfront wird hier der Nordteil der Front durch das südskandinavische Gebirge in seiner weiteren Ostbewegung gebremst, während der Südteil ungehindert nach Schweden vorstoßen kann, so daß es hinter dem Gebirgsvorsprung zu einer kurzzeitigen Verwirbelung kommt. Daß die Kaltfronttiefs im Skagerrak im Frühling und Sommer häufiger als im Herbst und Winter auftreten (Vgl. Tab. 6, oben und Abb. 27, S. 59), steht nicht im Gegensatz zu H.MACHTS (1937, S. 204) Feststellung, daß nämlich die Randwirbeltätigkeit in der kalten Jahreszeit, wenn eine zähe Kaltluftschicht hinter dem Gebirge die Wirbelbildung noch verstärkt, ihren Höhepunkt erreicht. Die Neubildungen sind dann tatsächlich häufiger, gleichzeitig aber auch kräftiger ausgebildet, so daß sie bei längerer Lebenszeit auch eine größere Strecke zurücklegen und daher zu den bahnbildenden Zyklonen gerechnet werden müssen.

Ein weiteres Häufungsgebiet der Kaltfronttiefs liegt in der Bottenwiek. Hier sind es vornehmlich die unterschiedlichen Reibungswiderstände, die eine West-Ost ziehende Kaltfront im Nordteil abbremsen, während der Südteil über die freie Wasserfläche

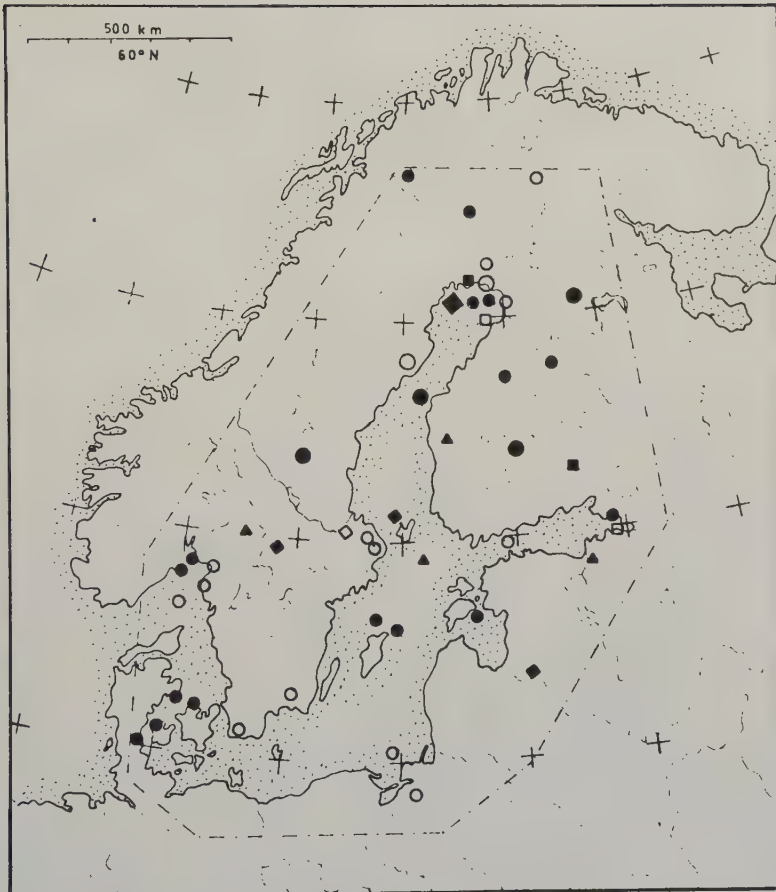


Abb. 27

Frontaltiefs

	Frühling	Sommer
Kaltfronttief	●	○
Staffeltief	◆	◇
Warmfrontwelle	▲	△
Okklusionstief	■	□

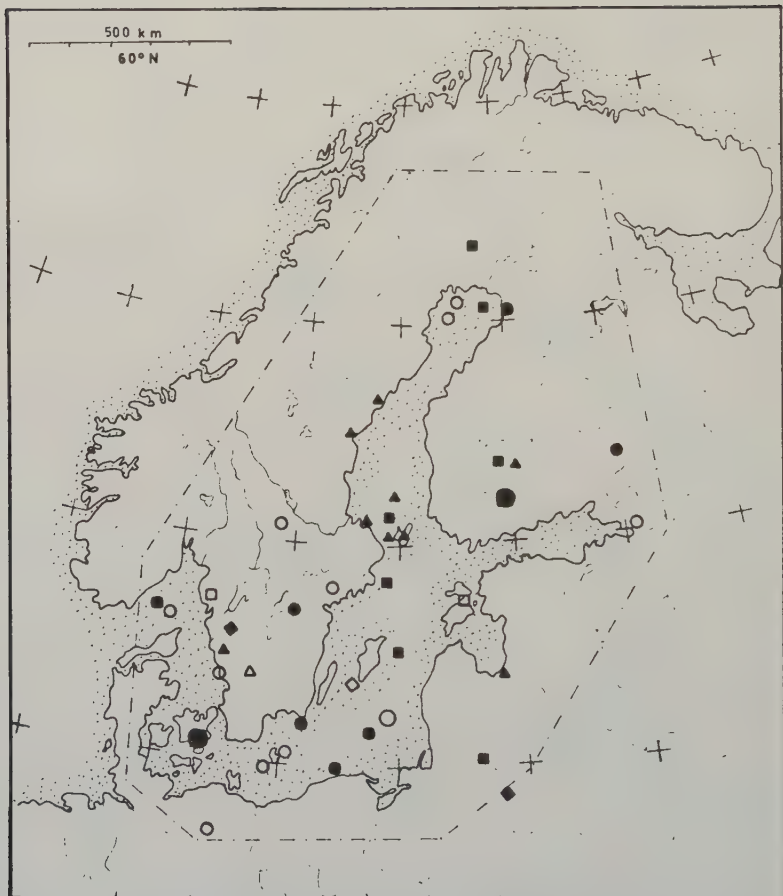


Abb. 28

Frontaltiefs

	Herbst	Winter
Kaltfronttief	○	●
Staffeltief	◇	◆
Warmfrontwelle	△	▲
Okklusionstief	□	■

schneller vorankommt, was neben anderen Ursachen zur Wirbelbildung beiträgt. Diese durch regionale Gegebenheiten bedingten Tiefbildungen treten nur bei süd- bis nordwestlichen Strömungen auf. Daß aber auch der Labilisierung durch den erwärmten Untergrund eine gewisse genetische Bedeutung zukommt, zeigen die Verhältnisse im Mai, in dem die Kaltfronttiefs hauptsächlich bei nördlichen Strömungen und vornehmlich über dem Festland auftreten. Sie erreichen in diesem Monat ihr Maximum (Vgl. Diagr. 5),

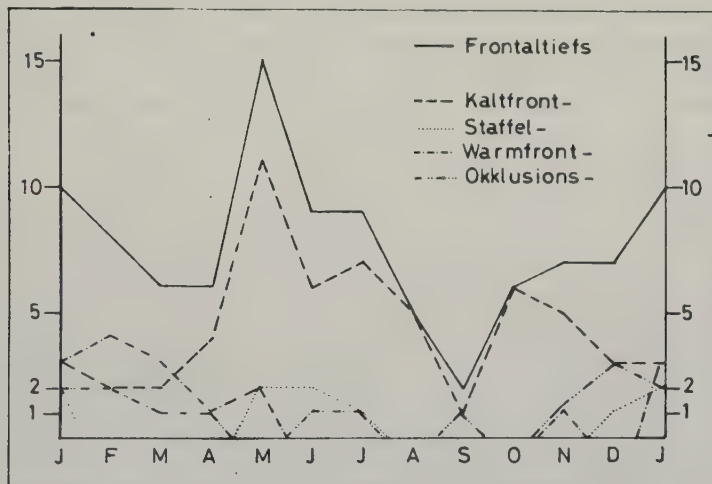


Diagramm 5 Jahresgang der Frontaltiefs

denn während sich das Land rasch erwärmt, hat die polare Kaltluftproduktion ihren Höhepunkt gerade überschritten, so daß die größeren Temperaturkontraste eine Zyklogenese begünstigen.

Ähnlich liegen die Verhältnisse bei den Staffeltiefs, die sich gehäuft im Mai und Juni bei Nordströmung bilden, während die Teiltiefbildungen an Warmfronten im Frühling besonders im März und April bei SW-Strömungen auftreten. In den Sommermonaten steht wieder die Zufuhr maritimer Polarluft aus westlichen Richtungen im Vordergrund, so daß bei den drei vorkommenden Typen (Kaltfront-, Staffel- und Okklusionstief) kräftige Schauerniederschläge und vereinzelte Gewitter auftreten. Im Herbst weisen die kurzfristig sichtbaren Frontaltiefs ebenso wie die Gesamtheit aller wandernden Zyklonen die geringste Häufigkeit auf. Da sich im September antizyklonale Wetterlagen mit größerer Regelmäßigkeit einstellen, finden in diesem Monat nur zwei Tiefbildungen

statt. Erst im Winter nimmt die Zahl der Fälle wieder stark zu und erreicht fast den Wert des Frühlings. Während die Zahl der Kaltfrontbildungen jetzt auf ein Minimum zurückgeht, treten die Tiefbildungen an Warmfronten stärker hervor. Ihr Verbreitungsgebiet von Südschweden bis Finnland (Vgl. Abb. 28, S. 60) spiegelt die südwestliche Strömung wider, bei der sie auftreten. Vor den sie bedingenden Warmfronten kommt es in einem breiten Streifen zu länger anhaltenden Aufgleitschneefällen. Auch die Teiltiefbildungen an Okklusionspunkten erreichen im Winter ihr Häufigkeitsmaximum. Sie liegen vornehmlich über der Ostsee, wo die Druckfalltendenzen durch die Unterlage noch verstärkt werden. Dieser Typ weist daher von allen kurzlebigen Frontaltiefs die tiefsten Kerndrücke auf.

D. Die wandernden Bodenzyklonen

Von den 1404 im Ostseeraum aufgetretenen Tiefdruckgebieten gehören nur 17 % zu den quasistationären Bodenzyklonen, während die überwiegende Mehrzahl aus wandernden Zyklonen besteht. Trennt man von dieser Zahl noch die Kaltlufttropfen ab, die gesondert untersucht werden, dann sind es 1012 Tiefdruckgebiete, die im Boden- (und Höhendruckfeld) eine größere Positionsverlagerung aufweisen.

Um nun diese große Zahl von Einzelbahnen zu ordnen, bieten sich mehrere Möglichkeiten an. Einmal kann man ein zeitliches Prinzip zu Grunde legen, indem die Gesamtheit aller Bahnen für ein bestimmtes Zeitintervall (Monat oder Jahr) dargestellt wird. Da sich dabei aber ein wirres Netz einander kreuzender Einzelbahnen ergäbe, ist man gezwungen, stärker zu generalisieren und kommt dann zu solchen Karten, wie sie z.B. von J.v.BEBBER (ab 1881) veröffentlicht worden sind. Diese Darstellungsweise hat zwar den Vorteil, sehr anschaulich zu sein, sie gibt aber die Vielfalt des atmosphärischen Geschehens nur sehr unvollkommen wieder, so daß der Betrachter durch die starke Vereinfachung leicht ein falsches Bild gewinnt. Deshalb hat sich von der Zugstraßeneinteilung J.v.BEBBERS bis heute auch nur noch die Vb-Bahn als Zugstraße in der Literatur erhalten, da es "ein besonderes Merkmal dieser Tiefdruckgebiete (ist), daß sie von der mittleren Zugstraße stets nur wenig abweichen, ganz im Gegensatz zu den Zyklonen anderer Bahnen, die wohl auch gewisse Gegenden bevorzugen, deren Zugstraßen sich aber doch mit der Zunahme der synoptischen Meldestellen so sehr verbreitert haben, daß eine Zuordnung zu einer bestimmten Bahn nicht mehr üblich ist" (R. SCHERHAG 1936, S. 66). (In diesem Zitat wird, wie häufig in der meteorologischen Literatur, der Bahnbegriff synonym für Zugstraße und Einzelbahn verwendet. Um Verwirrungen vorzubeugen, wird im Folgenden nur dann von einer Bahn gesprochen, wenn die Zugbahn einer einzelnen Zyklone gemeint ist.)

Diese eben beschriebene, stark vereinfachende Darstellungsweise von Zyklonenzugstraßen, die zuletzt von H.W.KLEIN (1957) benutzt wurde, ist in dieser Untersuchung nicht angewandt worden. Vielmehr wurde angestrebt, die Dynamik der atmosphärischen Abläufe auch kartographisch dadurch zum Ausdruck zu bringen, daß jede einzelne Zugbahn gezeichnet wird, da nur so ein Bild von den

wirklichen Verhältnissen entsteht. Um dabei aber nicht ein wirres Bahngeflecht zu erhalten, wurde das zeitliche durch ein den Bahnverlauf in den Vordergrund der Betrachtung stellendes Prinzip ersetzt. So konnte erst einmal die Gesamtheit aller wandernden Bodenzyklogen in gestreckte, gekrümmte, retrograde und aberrante Bahnen unterteilt werden. Diese wurden nun nach ihrem Verlauf zu Bahngruppen (abgekürzt: BG) zusammengefaßt und zur Darstellung gebracht. Eine Bahngruppe ist also dadurch definiert, daß alle in ihr enthaltenen Zugbahnen einen annähernd gleichartigen Verlauf aufweisen. Dabei können sich die Einzelbahnen innerhalb einer Bahngruppe zu verschiedenen, räumlich zu differenzierenden Bahnstreifen verdichten, auf die dann als geographisch wichtige Erscheinungen in der Beschreibung gesondert eingegangen werden muß, da die von ihnen ausgehende witterungsmäßige Beeinflussung räumlich verschieden ist. Bei diesen Bahnstreifen, die am ehesten dem Mittelbahnbegriff J.v.BEBBERS oder H.W.KLEINS nahekommen, muß allerdings die Frage vorerst noch offen bleiben, ob diese Konzentrationen von Einzelbahnen wirklich reell sind, oder ob sie nur auf dem verwendeten statistischen Material beruhen, so daß sich bei einem grösseren Untersuchungszeitraum möglicherweise ganz andere Bündelungen ergeben würden. Auch zeigt sich in der Gesamtheit aller Fälle, daß solche Bündelungen zu Bahnstreifen in dem relativ begrenzten Ostseeraum nicht sehr häufig vorkommen, so daß aus diesen Gründen die Bahngruppe als oberste Gliederungseinheit zu Grunde gelegt wird. Für sie wird im Folgenden die Typenverteilung, der Jahresgang, die Durchschnittsgeschwindigkeit und die Intensität der Zyklonen ermittelt und dargestellt.

1. Die Merkmale der Bahngruppen

a. Die Intensität der Zyklonen

Die Frage nach der Intensität und damit zusammenhängend auch nach dem Wirkungsbereich eines Tiefdruckgebietes ist klimatologisch von besonderem Interesse. Es hat sich aber gezeigt, daß weder das eine noch das andere bisher exakt bestimmt werden konnte. H.FLOHN und J.HUTTARY (1950) haben versucht, für die Zyklonen der Vb-Bahn einen Wirkungsbereich festzulegen, indem sie die spezifische Niederschlagsdichte dieser Wetterlage zur mittleren Niederschlagsdichte aller niederschlagsbringenden Wetterlagen in Beziehung setzten. Die 100 %-Linie sollte dann als eindeutige Grenze der relativen Wirksamkeit der Vb-Wetterlagen gelten. H.MAEDE (1951), der dieses Verfahren versuchsweise auch auf die Westwetterlagen im Bereich der südlichen Ostsee angewendet hat, mußte aber feststellen, daß die relative spezifische Niederschlagsdichte eine Größe ist, die im Hauptwirkungsbereich einer Wetterlage unter Umständen kleiner sein kann als in ihren Randbereichen, so daß sie nicht in jedem Fall für die Abgrenzung des Wirkungsbereiches einer Wetterlage herangezogen werden kann.

Die Intensität einer Zyklone ist zwar auf dem Umweg über die einzelnen begleitenden Wetterelemente zu erfassen, aber eine kurze Maßzahl, wie sie für die Bearbeitung von Zugbahnen von Nutzen wäre, läßt sich damit nicht erreichen. Auch der absolute Kerndruck allein ist noch kein Kriterium für die Intensität, obgleich es schon von wesentlicher Bedeutung ist, ob er bei 960 mb oder bei 1030 mb liegt. H.WOICK (1966) definiert die Intensität eines Druckgebildes durch die Stärke der Krümmung seiner Isobaren, die er auf mathematischem Wege mit Hilfe bestimmter, komplizierter Formeln berechnet. Auch wäre es denkbar, den Abstand der Isobaren voneinander, der ja ein Maß für den Druckgradienten darstellt, als Bestimmungsgröße heranzuziehen. Beide Verfahren setzen aber in jedem Fall eine detaillierte Untersuchung voraus, die in dieser Arbeit bei der großen Zahl der Fälle nicht durchgeführt werden konnte.

Die ungefähre Lage des Einflußbereiches ist durch die Festlegung der Bahnen bestimmt. Weiterhin gibt der Zyklontyp darüber Auskunft, ob der Wirkungsbereich größer oder kleiner

anzunehmen ist; denn eine stärker verwirbelte Zyklone hat im allgemeinen auch einen grösseren Umfang als eine kleinräumige Welle. Allerdings gibt es von dieser Regel auch viele Ausnahmen, da die Wirkung eines Tiefs in erster Linie von dem Frontensystem als dem Träger des zyklonalen Witterungsgeschehens abhängt. Um nun aber neben der Lage und Größe des Einflusßbereiches auch noch eine relative Aussage über die Intensität des Tiefs einer Bahngruppe machen zu können, wurden für jede Zyklone die beiden leicht bestimmbaren Größen

a) tiefster im Ostseeraum erreichter Kerndruck und
b) Anzahl der dazugehörigen geschlossenen Isobaren ermittelt, da sich in ihrem Zusammenwirken die Intensität einer Zyklone, zumindest, was die Luftbewegung angeht, in etwa widerspiegelt. Diese für jedes einzelne Tiefdruckgebiet gefundenen Werte bilden den Intensitätsfaktor IF (z.B. bedeutet IF 85/6, daß das Tief in seinem intensivsten Stadium bei 6 geschlossenen Isobaren einen Kerndruck von 985 mb aufweist). Die Häufigkeitsverteilung dieser Intensitätsfaktoren wurde für die Gesamtheit aller Fälle und für jede einzelne Bahngruppe in einem Intensitätsdiagramm dargestellt. Die Häufigkeiten wurden dabei in Prozent der Gesamtsumme angegeben, wobei sechs Klassen gebildet wurden (0,1 - 3,3 %; 3,4 - 6,6 %; 6,7 - 9,9 %; 10,0 - 13,3 %; 13,4 - 20,0 % und mehr als 20,0 %). Bei der Abgrenzung der Klassen ist davon ausgegangen worden, daß mindestens 30 Fälle zur Verfügung stehen, so daß in diesem Grenzfall jeder höheren Klasse ein Fall entspricht. Bei den Bahngruppen mit weniger als 30 Fällen wurde kein Diagramm gezeichnet, da hier die Schwankungsbreite der Prozentwerte unverhältnismäßig stark zunimmt.

Diagramm 6 (S. 67) zeigt die Intensitätsverteilung aller 1012 bahnbildenden Tiefdruckgebiete. Auf der Ordinate ist von unten nach oben die Zahl der geschlossenen Isobaren abgetragen, während die Abszisse von links nach rechts die Werte der Kerndrucke unter Weglassung der Hunderter und Tausender anzeigt. Darunter befinden sich die verschiedenen Klassen der Prozentanteile. (Die Signatur für die beiden letzten Klassen wurde schon hier aufgeführt, obwohl sich diese Klassen erst bei den Bahngruppen II und X finden.)

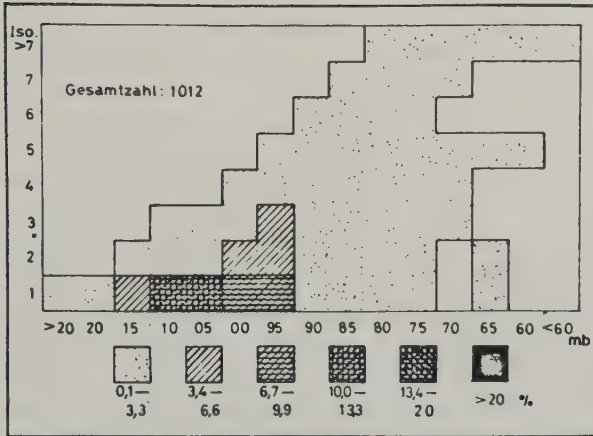


Diagramm 6 Verteilung der Intensitätsfaktoren aller bahnbildenden Tiefdruckgebiete

Das Diagramm zeigt, daß die Masse der Zyklonen zwischen 10/1 und 05/1 liegt und damit keine große Stärke aufweist, während der Anteil der intensiven Zyklonen (größer als 95/3) weniger als 3,3 % der Gesamtheit ausmacht. Die Extremwerte, die aber wegen der geringen Zahl der Fälle nicht in der Skaleneinteilung berücksichtigt wurden, liegen bei 1035/1 und 945/15. Während auf Grund der im linken Teil des Diagramms sehr regelmäßig ansteigenden Linie zu erkennen ist, daß ein enger Zusammenhang zwischen Kerndruck und höchstmöglicher Zahl der geschlossenen Isobaren besteht, zeigt die rechte Begrenzungslinie, daß tiefe Kerndrucke nicht immer mit einer grösseren Zahl von Isobaren zusammenfallen müssen. Besonders die Werte 65/1 und 65/2 deuten an, daß es sich hier um den Resonanztiefs ähnliche Erscheinungen handelt, bei denen das Tief ostwärts der Skanden innerhalb der Mehrzahl der Isobaren des Muttertiefs über dem Nordmeer liegt. Auf sie wird an entsprechender Stelle aufmerksam gemacht werden. Neben dem Diagramm aller Tiefdruckgebiete wird im Folgenden für jede mehr als 30 Fälle aufweisende Bahngruppe ein Intensitätsdiagramm mitgeteilt, so daß durch einen Vergleich beider Figuren ersichtlich wird, wie stark die Intensitätsverteilung einer Bahngruppe vom Gesamtdurchschnitt abweicht.

b. Die Durchschnittsgeschwindigkeit der Zyklonen

Neben der Intensität und dem Wirkungsbereich ist auch die Verlagerungsgeschwindigkeit einer Zyklone von großer klimatologischer Bedeutung. Von ihr ist einmal die Dauer der zyklonalen Beeinflussung eines Raumes überhaupt abhängig; zugleich wird von ihr aber auch die zeitliche Aufeinanderfolge der verschiedenen Witterungsabläufe eines Tiefs bestimmt. - Die Geschwindigkeit eines Tiefs ist in erster Linie abhängig von seinem Alter und verhält sich zu diesem umgekehrt proportional, d.h. sie ist im jungen Wellenstadium am größten und nimmt mit fortschreitender Alterung ab. Diese Abhängigkeit wird noch weiter modifiziert durch das Auftreten zu verschiedenen Jahreszeiten und über unterschiedlichen Unterlagen. Einige jährliche Mittelwerte, die sich aus diesen drei Faktoren zusammensetzen, sind in der folgenden Tabelle zusammengestellt.

Tabelle 7 Durchschnittsgeschwindigkeit der Zyklonen in verschiedenen Erdräumen

Verfasser	Untersuchungsraum	Geschwindigkeit in km/h
H.SCHOENWÄLDER (1953, S. 59)	ges. Nordhalbkugel	40
S.P.CHROMOW (1940, S. 414)	Verein. Staaten	46
"	Nordatlantik	29
"	Westeuropa	27
H.MAEDE (1954, S. 172)	Mitteleuropa	23

Die Tatsache, daß die Geschwindigkeit von Westen nach Osten abnimmt, wie es in der Tabelle zum Ausdruck kommt, ist eine Folge der oben angeführten Abhängigkeit vom Entwicklungsstadium. "In Europa treffen die atlantischen Zyklonen meist schon im okkludierten Altersstadium und daher mit verlangsamter Bewegung ein" (S.P.CHROMOW 1940, S. 416). Der Wert von 40 km/h, den H.SCHOENWÄLDER (1953) unter Berücksichtigung der gesamten Nordhalbkugel berechnete und den G.BAHRENBURG (1968) als Ausgangspunkt seiner Klasseneinteilung benutzte, liegt also für europäische Verhältnisse zu hoch. Dies kommt bei G.BAHRENBURG dadurch zum Ausdruck, daß die Durchschnittsgeschwindigkeit aller in Mitteleuropa auftretenden Tiefdruckgebiete nicht der von ihm festgelegten mittleren Wanderungsgeschwindigkeit entspricht, sondern darunter liegt. Trotz dieses Einwandes soll in dieser

Arbeit aber seine einmal vorgenommene Einteilung beibehalten werden, um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu ermöglichen.

Für die Erfassung der Durchschnittsgeschwindigkeit wurden nach G.BAHRENBURG (1968) drei Klassen gebildet, so daß einer langsamen Wanderung eine Geschwindigkeit von weniger als 25 km/h, einer mittleren Wanderung eine Geschwindigkeit von 25 bis 50 km/h und einer schnellen Wanderung eine Geschwindigkeit von mehr als 50 km/h entspricht. Bezogen auf 24 Stunden bedeutet dies, daß ein Tief eine Strecke von weniger als 600 km, zwischen 600 und 1200 km und mehr als 1200 km pro Tag zurücklegt. Um nun die in den verschiedenen Bahngruppen erreichten Durchschnittswerte miteinander vergleichen zu können, wurde durch eine Bewertung der langsamen Wanderung mit 1, der mittleren mit 2 und der schnellen mit 3 ein Geschwindigkeitskoeffizient gebildet, indem die Summe dieser Werte durch die absolute Häufigkeit der Zyklonen in einer Bahngruppe geteilt wurde:

$$GK = \frac{1 A(l) + 2 A(m) + 3 A(s)}{N}$$

A(l) = absolute Häufigkeit der Tiefs mit langsamer Wanderung

A(m) = " " " " " mittlerer Wanderung

A(s) = " " " " " schneller Wanderung

N = " " " " innerhalb einer Bahngruppe

Der Geschwindigkeitskoeffizient kann also zwischen 1 (alle Tiefs wandern langsam) und 3 (alle Tiefs wandern schnell) liegen und erreicht genau den Wert 2, wenn alle Zyklonen in einer Bahngruppe eine mittlere Geschwindigkeit aufweisen.

2. Die gestreckten Bahnen

Ausgehend von den weiter oben angeführten Überlegungen sollte in dieser Arbeit versucht werden, den Ablauf der atmosphärischen Vorgänge möglichst wirklichkeitsnah wiederzugeben. Deshalb werden keine äußeren Grenzlinien oder mittlere Zugstraßen gezeichnet, sondern jede Einzelbahn in ihrem wirklichen Verlauf dargestellt. Bei der Zusammenlegung der einzelnen Zyklonenzugbahnen zu Bahngruppen muß erst einmal die Bewegungsrichtung berücksichtigt werden, so daß nur Zyklonen zusammengefaßt werden, die einen gleichartigen oder ähnlichen Verlauf

aufweisen. Bei den nicht gestreckten Bahnen bereitet diese Zusammenfassung wenig Schwierigkeiten, da als Zuordnungskriterium neben der Herkunftsrichtung auch die Stärke der Krümmung berücksichtigt werden kann. Bei den gestreckten Bahnen ist diese Zusammenfassung zu Bahngruppen aber wesentlich schwieriger, da hier nur die Zugrichtung als Zuordnungskriterium zur Verfügung steht. Daß bei dieser Zusammenfassung ein großer Unsicherheitsfaktor im Ermessensspielraum des Bearbeiters liegt, hatte schon J.v.BEBBER (1891, S. 362) erkannt, als er schrieb: "Die Durchführung solcher Arbeit ist offenbar mit mancher Willkür verknüpft, und selbst dann, wenn man auch den festen Willen hat, rücksichtslos vorzugehen, so kann es dennoch geschehen, daß man in zweifelhaften Fällen ganz absichtslos sich nach der einen oder anderen Richtung einseitig entscheidet".

Um nun die große Zahl von gestreckten Einzelbahnen sinnvoll zu gliedern und um gleichzeitig der Gefahr des subjektiven und damit unwissenschaftlichen Probierens zu entgehen, wurde die Zugrichtung jedes Tiefs möglichst genau bestimmt und parallele Zugbahnen zu mehr oder minder dichten Richtungsstreifen zusammengelegt. Dabei wurde wegen der Kartenprojektion noch eine Konvergenz oder Divergenz der Richtungen $\pm 4^\circ$ als parallel angesehen. Auf Grund dieser Zusammenlegungen jeweils parallel verlaufender Zyklonen entstanden 29 Richtungsstreifen, die sich in der Richtung, mit der die sich in ihnen bewegendenden Zyklonen das Ostseegebiet durchqueren, um jeweils etwa 10° unterscheiden. Um das Ergebnis dieser Zusammenfassungen graphisch zu veranschaulichen, wurde als Darstellungsform ein Sektorendiagramm gewählt, in welchem jeder Sektor einen Richtungsstreifen repräsentiert. Die Richtung dieser Streifen wird dabei durch die Richtung der Sektoren ausgedrückt, während die Länge der Sektoren ein Maß für die in dem jeweiligen Richtungsstreifen verlaufende Zahl von Zyklonen angibt (Vgl. Abb. 29). Die Unterschiede der Schenkellängen der einzelnen Sektoren sind entsprechend der großen Varianz der Häufigkeiten (zwischen 1 und 108 Fälle) in Wirklichkeit sehr viel größer. Aus Raumgründen wurde aber auf eine absolute Darstellung, in der diese Unterschiede sehr viel deutlicher geworden wären, verzichtet und stattdessen der angegebene Maßstab verwendet.

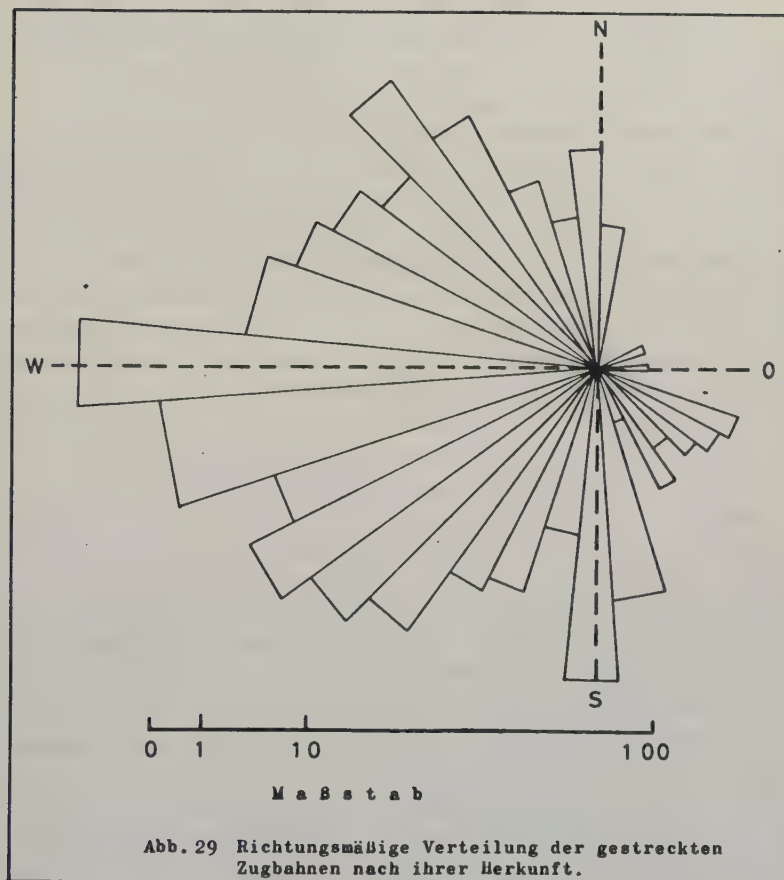


Abb. 29 Richtungsmäßige Verteilung der gestreckten Zugbahnen nach ihrer Herkunft.

Die Abbildung zeigt, daß die Herkunftsrichtungen zwischen NNO und OSO nur von zwei Tiefdruckgebieten begangen werden und damit praktisch frei sind von Zyklonenzugbahnen, während der Schwerpunkt eindeutig auf der rein westlichen Herkunftsrichtung liegt, die mit 108 Zugbahnen die größte Anzahl aufweist. Hierin zeigt sich ein Unterschied zu Mitteleuropa, wo nach G. BAHRENBURG (1963) die westsüdwest- bis südwestlichen Richtungen dominieren.

Da die Sektoren nur die Richtung der Streifen anzeigen, geht aus der Darstellung noch nicht hervor, ob sich z.B. bei der reinen West-Ost-Richtung im konkreten Fall das Tief über Lapp-

land oder über Norddeutschland nach Osten bewegt. Dieser geographisch wichtige Gesichtspunkt kommt vielmehr erst in den weiter unten folgenden Einzelkarten wieder zum Ausdruck.

Diese 29 so gewonnenen Richtungsstreifen sollten nun zu größeren Bahngruppen zusammengefaßt werden. Ausgehend von der Überlegung, daß es neben der Richtung besonders die dreidimensionale Struktur der Zyklonen ist, die den Wetterablauf maßgeblich bestimmt, wurde für jeden Richtungsstreifen die Verteilung der Tiefdrucktypen ermittelt und mit den Nachbarstreifen verglichen. Ergaben sich dabei nur unbedeutende Unterschiede, dann wurden beide Richtungsstreifen zu einer Bahngruppe vereinigt, deren Zusammensetzung dann wieder mit den nächstliegenden Nachbarn verglichen wurde. Ergaben sich dagegen signifikante Unterschiede, dann wurde eine Trennung beibehalten. Sie wurde auch dann durchgeführt, wenn trotz gleicher Typenverteilung sich die Richtung zu stark änderte, da die Erfahrung lehrt, daß die witterungsmäßigen Konsequenzen bei stärker differierenden Herkunftsrichtungen unterschiedlich sind. Dieser Fall trat aber nur zweimal ein, womit die schon von G. BAHRENBURG (1963) ermittelte Tatsache belegt wird, daß sich bei verändernder Herkunftsrichtung auch die spezifische Typenverteilung ändert. Die Entscheidung, ob nun die Typenverteilung eines Richtungsstreifens mit der Verteilung auf dem Nachbarstreifen ähnlich ist oder nicht, wurde mit Hilfe des χ^2 -Testes herbeigeführt. Dieser Test legt den Grad der Wahrscheinlichkeit fest, mit der eine bestimmte Typenverteilung von einer anderen überzufällig abweicht (Vgl. dazu E. KREYSZIG (1965), D. MARSAL (1967) und E. MITTENECKER (1966)). Dieses Verfahren soll an dem folgenden Beispiel kurz erläutert werden:

Haben wir zwei Streifen I und II, auf denen sich die Tiefdrucktypen A, B, C und D in folgender Weise verteilen

	A	B	C	D	Summe
I	6	7	9	8	30
II	17	18	11	19	65

dann hat auf Streifen I der Typ A einen Anteil von 20,0 %, Typ B einen Anteil von 23,3 %, Typ C einen Anteil von 30,0 % und Typ D einen Anteil von 26,6 % an der Gesamtsumme. Ist die Verteilung von Streifen II ähnlich, dann müßten wir dort die gleichen relativen Verhältnisse erwarten, d.h. der Typ A müßte eine Häufigkeit von 13,0 (20,0 % von 65), Typ B eine Häufigkeit von

15,1 (23,3 % von 65), Typ C eine Häufigkeit von 19,5 (30,0 % von 65) und Typ D eine Häufigkeit von 17,3 (26,6 % von 65) aufweisen. Mit der allgemeinen Formel

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^{i=n} \frac{(o_i - e_i)^2}{e_i}$$

o_i = beobachtete Häufigkeit des Typs i
 e_i = erwartete Häufigkeit des Typs i
 n = Anzahl der Typen
 i = Laufindex der Typen
 $df = n - 1$

wird nun die erwartete Häufigkeit (e) mit der beobachteten Häufigkeit (o) verglichen, was sich in unserem Beispiel so darstellen würde:

$$\begin{aligned}\chi^2 &= \frac{(17 - 13)^2}{13} + \frac{(18 - 15,1)^2}{15,1} + \frac{(11 - 19,5)^2}{19,5} + \frac{(19 - 17,3)^2}{17,3} \\ \chi^2 &= 1,23 + 0,55 + 3,70 + 0,16 \\ \chi^2 &= 5,64\end{aligned}$$

Für diesen erhaltenen Chi-Quadrat-Wert können wir nun in eigens für diesen Test entwickelten Tabellen prüfen, welchen Wahrscheinlichkeitswert die Abweichung der Typenzusammensetzung von Streifen I gegenüber Streifen II aufweist. Allerdings muß beim AbleSEN berücksichtigt werden, wieviele Einzeltypen miteinander kombiniert wurden. Haben wir, wie in unserem Beispiel, vier Typen, dann braucht eigentlich nur die Häufigkeit von dreien berücksichtigt werden, denn die letzte Häufigkeit ist nicht mehr "frei"; sie kann aus den anderen berechnet werden. Die Zahl der sogenannten Freiheitsgrade (df) ist also immer um eins geringer als die Summe aller Typen, oder, allgemein ausgedrückt, bei n Typen $n - 1$.

Unser ermitteltes χ^2 von 5,64 gibt bei drei Freiheitsgraden an, daß die Abweichung der beobachteten von der erwarteten Häufigkeitsverteilung mit 80 - 90 % Wahrscheinlichkeit überzufällig ist. Diese Wahrscheinlichkeit ist aber nicht hoch genug, als daß man sagen könnte, es handelt sich wirklich um verschiedene Verteilungen. Da Richtungsstreifen immer nur dann getrennt wurden, wenn die Wahrscheinlichkeit über 95 % lag (man spricht in diesem Fall auch von einer Signifikanz auf dem 5 %-Niveau), würde in unserem Fall Streifen I mit II vereinigt werden.

Da der χ^2 -Test nur anwendbar ist, wenn die erwartete Häufigkeit eines Typs gleich oder größer als 5 ist, konnten bei einigen Streifen nur die häufigsten Typen für einen Vergleich herangezogen werden, während der Rest, zu einer einzigen Klasse vereinigt, verglichen wurde.

Mit Hilfe dieses Testes konnten die 29 Richtungsstreifen zu 10 Bahngruppen zusammengefaßt werden. Das Ergebnis zeigt Abb. 30 (S. 75), in der in der schon bekannten Weise die Richtungen der Bahngruppen durch Sektoren dargestellt sind. Die Breite der durch die dicken Linien und die unterschiedliche Schraffur getrennten Sektoren gibt dabei unter anderem an, wie stark die Zugrichtung der in einer Bahngruppe zusammengefaßten Zyklonen variiert. Dadurch, daß auch Abb. 29 (S. 71) in die Darstellung projiziert wurde, läßt sich erkennen, wieviele und welche der alten Richtungsstreifen in den neuen 10 Bahngruppen aufgegangen sind. So zeigt sich z.B., daß Bahngruppe VI nur aus einem früheren Richtungsstreifen besteht. Die Typenverteilung unterscheidet sich hier so signifikant von den Nachbarn, daß alter Richtungsstreifen und neue Bahngruppe zusammenfallen; deshalb verlaufen hier die Einzelbahnen am parallelsten. Dagegen erreichen die Unterschiede in der Typenverteilung zwischen BG IV/V und VII/VIII nicht ganz die erforderliche Signifikanz. Trotzdem wurde auch hier eine Trennung vorgenommen, da anderenfalls zu sehr differierende Herkunftsrichtungen zu einer Bahngruppe zusammengefaßt worden wären.

In der nun folgenden Beschreibung der einzelnen Bahngruppen wird nicht in der Reihenfolge der absoluten Häufigkeiten vorgegangen, da dadurch Zusammenhänge benachbarter Bahngruppen zerrissen würden und Wiederholungen in der Beschreibung unvermeidlich wären. Vielmehr wird mit der südöstlichen Bahngruppe begonnen, woran sich dann die anderen BG entsprechend der Nummerierung im Uhrzeigersinn anschließen. - Um einen Überblick über den Verlauf der Einzelbahnen zu allen vier Jahreszeiten gleichzeitig zu ermöglichen, werden auf einem Blatt zwei Karten dargestellt, die jeweils zwei Jahreszeiten zeigen. Dabei sind die Zugbahnen der häufiger begangenen Jahreszeit durchgezogen gezeichnet, während die anderen gestrichelt dargestellt werden. Eine gepunktete Linie deutet an, daß das Tiefdruckgebiet noch keine oder schon nicht mehr eine geschlossene Isobare aufweist, obwohl die Bahn noch gut zu verfolgen ist. Die eingezeichneten

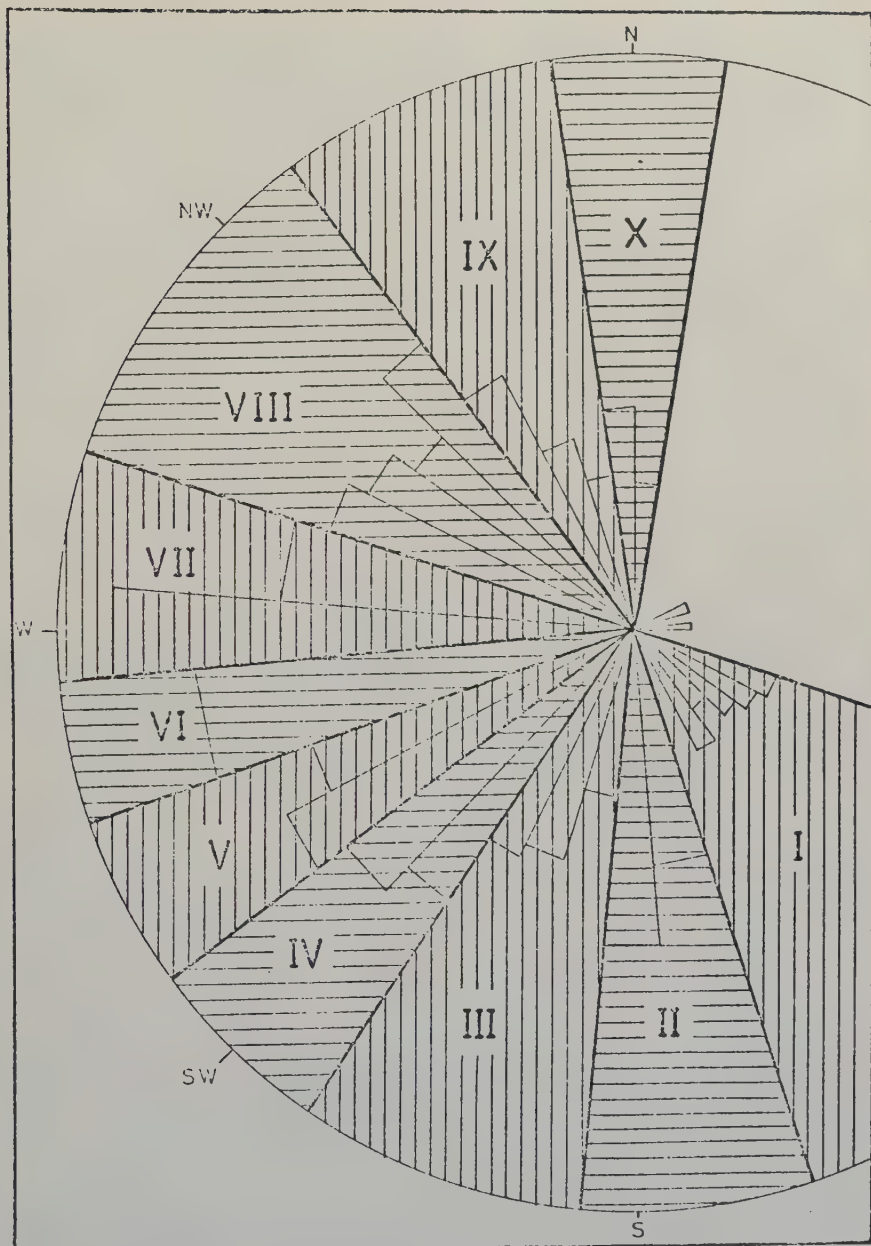


Abb. 30 Richtungsmäßige Verteilung der gestreckten
Bahngruppen

Signaturen, die jeweils den Standort des Tiefs bezeichnen, liegen immer 24 Stunden auseinander, so daß aus der Entfernung zwischen ihnen auf die Verlagerungsgeschwindigkeit geschlossen werden kann.

a. Bahngruppe I

Die synoptischen Situationen, die zur Begehung der in den ersten drei BG zusammengefaßten Zyklonenzugbahnen führen, sind in gewisser Weise untereinander gleich, denn es handelt sich bei ihnen immer um eine Trogsteuerung. Liegt ein blockierendes Hoch über Nordrußland, dann wird die Höhenströmung gezwungen, einen Trog über Europa zu bilden und das Hoch in einem weiten Bogen im Norden zu umrunden. Auf der Vorderseite dieses Troges werden die Zyklonen, die alle eine südliche Komponente in der Bewegungsrichtung aufweisen, nach Norden gesteuert.

Bei der Bahngruppe I liegt das Hoch über dem nördlichen Rußland, so daß die Trogachse eine NW/SO-Erstreckung besitzt. Auf der Nordostseite dieses Troges kommen die Tiefs aus dem osteuropäischen Raum in das Ostseegebiet. Diese synoptische Lage ist aber nicht sehr beständig, da das Hoch oft nach NW vordringt, wobei dann der Trog eingeengt wird, so daß es in ihm häufig zur Abschnürung eines Kaltlufttropfens kommt, der eine Umstellung der Zirkulation herbeiführt. Infolgedessen ist auch die Frequenz der BG I mit 35 Fällen relativ gering. - Die Erhaltungstendenz der Tiefs, die sich auf dieser, der normalen W-O-Verlagerung nahezu entgegengesetzten Richtung bewegen, ist nicht sehr stark, denn da die Höhenströmung spätestens über dem Nordkap ihre normale W-O-Richtung wieder einnimmt, sterben die meisten Zyklonen noch innerhalb des Ostseeraumes ab (Vgl. Abb. 31/31, S. 78).

Auch intensitätsmäßig steht die BG I an letzter Stelle aller Bahngruppen; denn da die Höhenströmung schon über dem mittleren Ostseeraum beginnt, wieder nach Osten abzubiegen und damit gegen den Drehsinn der Zyklonen zu verlaufen, fehlt es diesen an Impulsen zu größerer Vertiefung, so daß sich die Intensitätsfaktoren ziemlich eng um den Wert $00/2$ konzentrieren, während größere Werte, wie sie die Gesamtverteilung aufweist, völlig fehlen. Der im Verhältnis zur Gesamtzahl überdurchschnittliche Anteil von $90/3$ fällt in den Herbst und Winter (Vgl. Diagr. 7).

Der Geschwindigkeitskoeffizient liegt mit einem Wert von 1,83 unterhalb der mittleren Wanderungsgeschwindigkeit, da fast 1/3 aller Tiefdruckgebiete ein Höhentief ausgebildet haben; er ist aber etwas höher als der der benachbarten Bahngruppe II (GK = 1,70). Diese Differenz rührt daher, daß bei I der Trog weiter nach Rußland hineinreicht, so daß aus dem stärkeren Temperaturkontrast zwischen der kalten Polarluft und der sommerlich erhitzten Festlandluft über Westrußland eine kräftigere Frontalzone resultiert, die die höheren Geschwindigkeiten bewirkt.

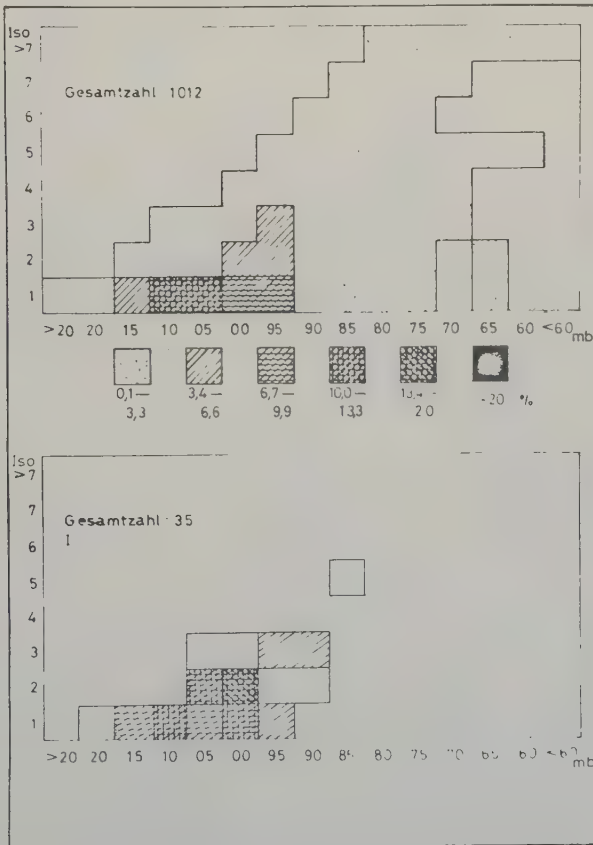


Diagramm 7 Verteilung der Intensitätsfaktoren

Abb. 31 Bahngruppe I

----- Frühling
 ----- Sommer

- kaltfrontwelle
- kaltfronttief
- Staffeltief
- Warmsektorzyklone
- Okklusionstief
- ▽ Zentralzyklone
- ▼ kaltes Tief
- Deszend. Zykl.
- Aszend. Zykl.

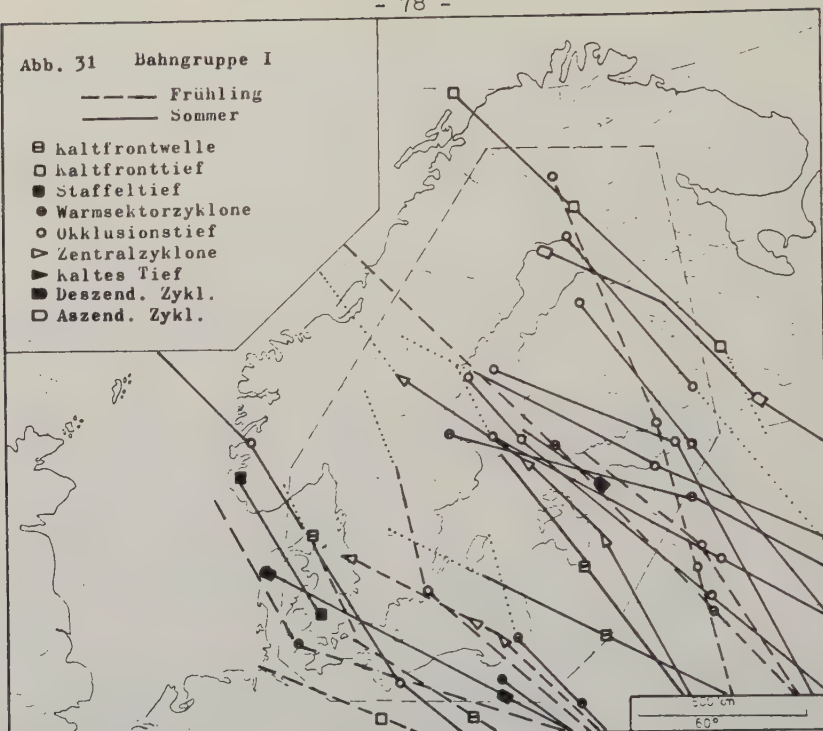
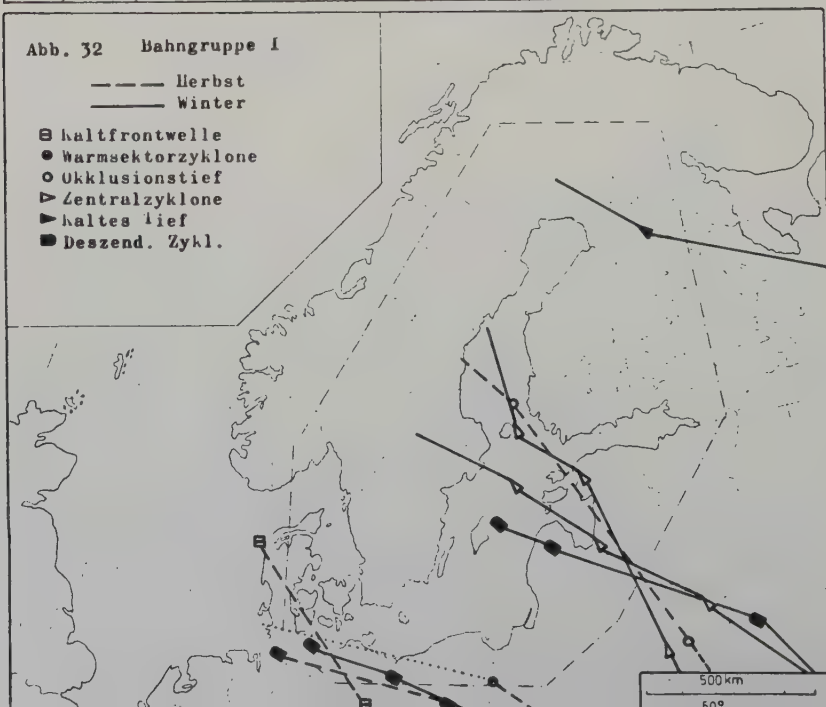


Abb. 32 Bahngruppe I

----- Herbst
 ----- Winter

- kaltfrontwelle
- Warmsektorzyklone
- Okklusionstief
- ▽ Zentralzyklone
- ▼ kaltes Tief
- Deszend. Zykl.



Wie aus der Tabelle 8 (S. 79) hervorgeht, handelt es sich bei der Bahngruppe I um eine ausgesprochen sommerliche Erscheinung. Mehr als die Hälfte aller Fälle treten in den Sommermonaten auf. Während in dieser Jahreszeit fast alle Typen vertreten sind, wird diese Richtung im Winter nur von Zyklonen gegangen, die ein Höhentief ausgebildet haben.

Tabelle 8 Bahngruppe I

Tiefdrucktypen	Frühling	Sommer	Herbst	Winter	Jahr	%
Kaltfrontwelle	1	2	1	-	4	12,0
Kaltfronttief	1	1	-	-	2	6,0
Staffeltief	-	1	-	-	1	3,0
Warmsektorzyklone	2	4	1	-	7	20,5
Okklusionstief	3	6	1	-	10	29,5
Zentralzyklone	1	1	-	2	4	12,0
Kaltes Tief	-	-	-	1	1	3,0
Deszend. Zykl.	-	2	1	2	5	14,5
Aszend. Zykl.	-	1	-	-	1	3,0
Summe	8	18	4	5	35	

Das ausgeprägte Sommermaximum kommt auch in der Kurve des Jahresganges gut zum Ausdruck, denn allein auf den Juli entfallen 14 Tiefdruckgebiete (Vgl. Diagramm 8).

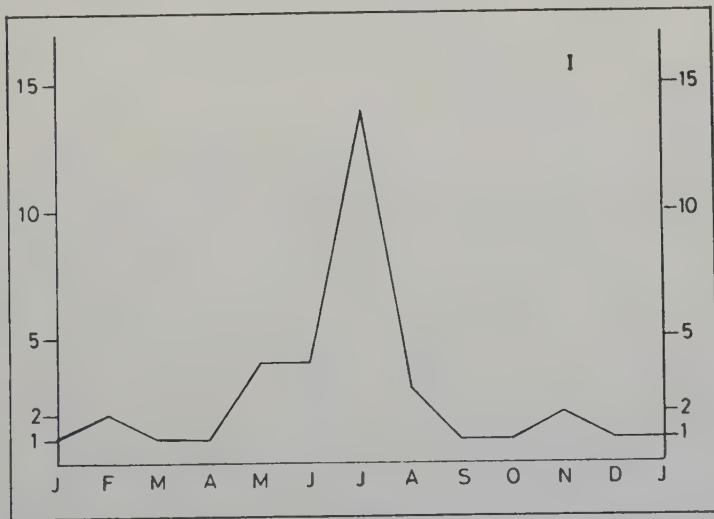


Diagramm 8 Jahresgang der Bahngruppe I

Obwohl die Bahnen über die ganze Breite des Untersuchungsgebietes hinweggehen (Vgl. Abb. 31/32, S. 78), lassen sich doch zwei Bahnstreifen erkennen, in denen sich die Einzelbahnen konzentrieren und die durch die Linie Minsk-Stockholm in etwa getrennt werden. Da sie sich in ihren witterungsmäßigen Auswirkungen auf das Ostseegebiet unterscheiden, werden sie getrennt besprochen.

Liegt ein blockierendes Hoch über Finnland, dann verläuft die Achse des Höhentrogas über Mitteleuropa von NW nach SO, so daß die Zyklonen aus Westrußland über die südliche Ostsee nach Dänemark ziehen, wo sie zumeist absterben. Die Tiefs führen auf ihrer Nordseite kontinentale Warmluft in den südlichen Ostseeraum, die besonders im späten Frühling beim Aufgleiten auf die kalte Maritimluft zu anhaltenden Niederschlägen führt, während sich im Sommer die Witterung durch hohe advektive Temperaturen und durch Trockenheit auszeichnet. - Bildet sich an der NW/SO verlaufenden Massengrenze zwischen kontinentaler Warmluft und maritimer Polarluft eine schleifzonenartige Anordnung der Front aus, kann es in einem engen Streifen parallel zur Front zu höchster Niederschlagsintensität kommen. Eine solche Lage ist von D.KOHNKE (1965) beschrieben worden. Am 27. September 1965 wurde eine Schönwetterperiode durch eine Teiltiefbildung südöstlich von Berlin abrupt beendet. Durch den Vertiefungsprozeß des Tiefs wurde eine Kaltfront, die bis Sachsen vorgedrungen war, als Warmfront rückläufig, so daß feucht-warme Luftmassen aus Osten auf die über Westeuropa lagernde Kaltluft aufglitten. Das Tief verlagerte sich an der Vorderseite des Trogas mit der südsüdöstlichen Höhenströmung in die westliche Ostsee, so daß in einem engbegrenzten Band von Lüchow/Dannenberg bis Husum mehr als 60 mm Niederschlag fiel. Damit erhielten verschiedene Orte in diesem Gebiet innerhalb von 24 Stunden mehr Niederschläge als dem ganzen Monatsdurchschnitt September entsprach.

Bei dem nördlichen Bahnstreifen erstreckt sich der Trog von der Nordsee bis weit nach Südosteuropa hinein, so daß besonders krasse Temperaturgegensätze entstehen. An dieser Luftmassengrenze bilden sich die Tiefs, die am Westabhang des blockierenden Hochs über Minsk/Smolensk in die mittlere Ostsee gesteuert werden. Durch die von ihnen mitgeführte Warmluft wird nördlich des Hochs noch ein Keil hohen Drucks angebaut, so daß diese Zyklonen noch zur Ausweitung des Hochs nach Norden beitragen,

Neben hochreichender Erwärmung bringen sie Finnland und Nordschweden verbreitete Niederschläge. Haben die Tiefs die mittlere Ostsee erreicht, so sterben sie meist ab. Dabei kann es vorkommen, daß der Kern über der Ostsee liegenbleibt, während das Frontensystem die Skanden überquert und sich an ihm vor der norwegischen Küste ein neues Tief ausbildet. Dies ist eine direkte Umkehrung eines später bei den westlichen Bahngruppen noch zu besprechenden Vorgangs, wo der Kern vor der norwegischen Küste liegenbleibt und sich an den Fronten im Ostseegebiet ein neues Tief ausbildet.

Im Herbst und Winter reicht der Warmluftvorstoß auf der Nordseite der Zyklonen oft über Nordfinnland hinweg bis zum Nordmeer, so daß ein über Skandinavien lagernder Trog von der nördlichen Kaltluftzufuhr abgeschnitten wird und sich in ihm über Südsandinavien ein Kaltlufttropfen abschnürt. Wird die Warmluft noch weiter um den über der Ostsee lagernden Kern herumgeholt, dann dringt sie über Schweden südwärts vor und verursacht bei ihrem Aufgleiten auf die vorgelagerte Bodenkaltluft starke Schneefälle, die auch bis zur deutschen Ostseeküste übergreifen können.

In diesem Zusammenhang muß eine Arbeit von T.BERGERON (1949) über die Niederschlagsverteilung an der schwedischen Ostküste bei NNO- bis SO-Wind erwähnt werden. Obwohl sich die Untersuchung auf die kalte Jahreszeit bezieht und damit nicht primär die südlichen Sommerbahnen betrifft, sollen die Verhältnisse schon hier dargestellt werden, da neben den östlichen Rückseitenströmungen der Bahngruppen VII bis X vor allem die Winde auf der Vorderseite von Zyklonen der Bahngruppe I gegen die schwedische Küste wehen. Abb. 33 (S. 82) zeigt die Niederschlagsverteilung an der nordschwedischen Küste während der Monate August bis April. Deutlich treten mehrere Maxima hervor, die sich parallel zur Küste erstrecken. Abb. 34 (S. 82) zeigt die gleiche Erscheinung an drei Profilen entlang verschiedener Breitenkreise. Obwohl das Land nur langsam ansteigt, zeigt sich in etwa 20 km Entfernung von der Küste ein ausgesprochenes Niederschlagsmaximum, das von einem Minimum weiter landeinwärts gefolgt wird. Erst in der Nähe der Wasserscheide der Skanden wird das Küstenmaximum wieder erreicht und überschritten, hier aber bedingt durch Steigungsregen bei westlichen Winden. - Nicht nur in Nordland, sondern auch an der Küste südlich von Stockholm

ist das gleiche Niederschlagsmaximum zu bemerken.

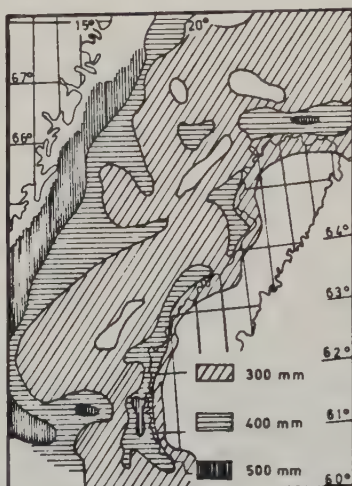


Abb. 33 Durchschnittliche Niederschlagsverteilung in Nordschweden für die Monate August bis April (1909-1925)

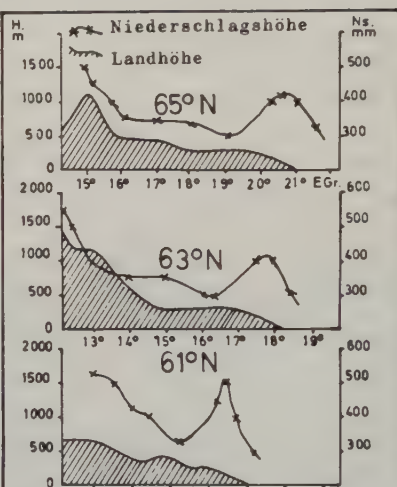


Abb. 34 Profile der Niederschlagshöhe und der Landhöhe entlang des 61., 63. und 65. Breitenkreises.

nach T.BERGERON 1949, S. 16

Bei diesen küstennahen Maxima wirken mehrere Umstände zusammen. Einmal nimmt die über das offene Wasser der Ostsee transportierte kalte Luft sehr viel Wasserdampf auf (Vgl. J. HANKIMO, 1964), so daß das Kondensationsniveau sehr niedrig liegt. Gleichzeitig werden die untersten Schichten durch das warme Wasser labilisiert, so daß eine geringe Hebung ausreicht, um die Konvektion auszulösen. Diese Hebung wird bei auflandigem Wind dadurch erreicht, daß durch die vergrößerte Bodenreibung die untersten Schichten gebremst werden, so daß die nachfolgenden Luftmassen zum Aufgleiten gezwungen werden. Während dieser Effekt erst eine Strecke landeinwärts wirksam wird, wo das an der Küste eingeleitete schräge Aufgleiten zur maximalen Wolkenbildung führt, bewirkt die vergrößerte Bodenreibung bereits direkt an der Küste einen unmittelbaren vertikalen Austausch, der zur Bildung oder Verdichtung von Küstenwolken führt (Vgl. T.BERGERON, 1949).

b. Bahngruppe II

Obwohl diese Bahngruppe bedeutend weniger Richtungsstreifen als BG I enthält (Vgl. Abb 30, S. 75), ist die Zahl der Zyklonen, die eine rein süd-nördliche Bewegungsrichtung aufweisen, fast doppelt so hoch wie bei I.

Tabelle 9 Bahngruppe II

Tiefdrucktypen	Frühling	Sommer	Herbst	Winter	Jahr	%
Kaltfrontwelle	2	4	1	-	7	11,5
Kaltfronttief	2	2	-	1	5	8,5
Staffeltief	1	1	-	-	2	3,5
Warmsektorzyklone	-	4	4	1	9	13,5
Okklusionstief	7	9	6	2	24	40,0
Zentralzyklone	2	4	-	1	7	11,5
Kaltes Tief	2	-	-	-	2	3,5
Aszend. Zykl.	-	1	2	1	4	6,2
Summe	16	25	13	6	60	

Ein Vergleich mit der Typenverteilung von BG I zeigt, daß der Anteil der okkludierten Zyklonen auf Kosten der Warmsektorzyklonen stark zugenommen hat, während Deszendierende Zyklonen völlig fehlen. Bildet man die Klassen a) Warmsektorzyklone, b) Okklusionstief, c) Deszendierende Zyklone und d) Rest, dann weist der χ^2 -Wert von 17,6 bei drei Freiheitsgraden mit 99,9 % Wahrscheinlichkeit auf einen überzufälligen Unterschied zwischen beiden Bahngruppen hin. Während in Mitteleuropa der Anteil der Kaltfrontwellen an der reinen Südrichtung noch die Hälfte aller Fälle ausmacht, so daß G. BAHRENBURG (1968) diese Bahn noch als typische Schleifzonenbahn bezeichnete, geht im nördlichen Anschlußraum ihr Anteil auf rund 12 % zurück. Im Frühling und Sommer erreichen sie zwar noch das Gebiet der südlichen Ostsee, sterben dort aber schnell ab. Die meisten Wellen sind also auf ihrem Weg nach Norden stärker verwirbelt und treten im Ostseeraum als Okklusionstiefs auf. Daher liegt der Geschwindigkeitskoeffizient mit 1,70 auch beträchtlich unter dem Wert der mitteleuropäischen Südbahn (GK = 2,2).

Wie Diagramm 9 (S. 84) zeigt, handelt es sich auch bei der Bahngruppe II um eine ausgeprägt sommerliche Erscheinung. Hier ist es der Monat August, auf den wiederum allein 14 Zyklonen entfallen.

Die Tiefdruckgebiete, die den Ostseeraum von Süden erreichen, haben ihr Entstehungsgebiet zumeist nördlich und südlich der Alpen und wandern auf einer Bahn, für die sich die Bezeichnung

"Vb-Bahn" eingebürgert hat. Diese von J.v.BEBBER für die Jahre 1876 bis 1880 ermittelte Zyklonenzugstraße ist an eine bestimmte synoptische Situation gebunden.

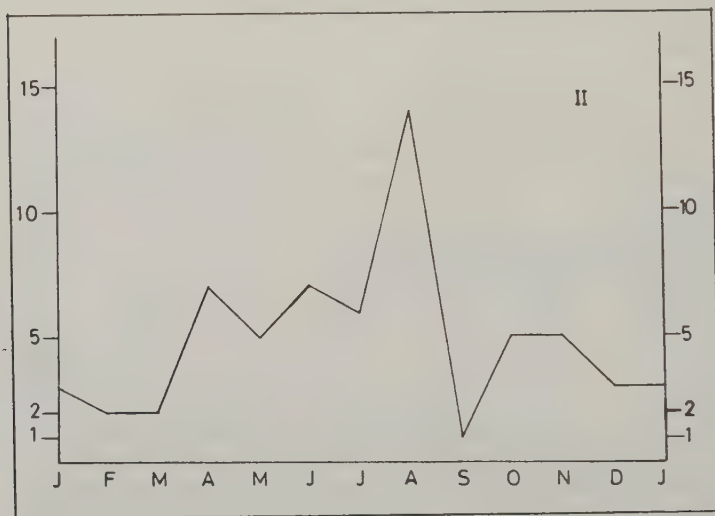


Diagramm 9 Jahresgang der Bahngruppe II

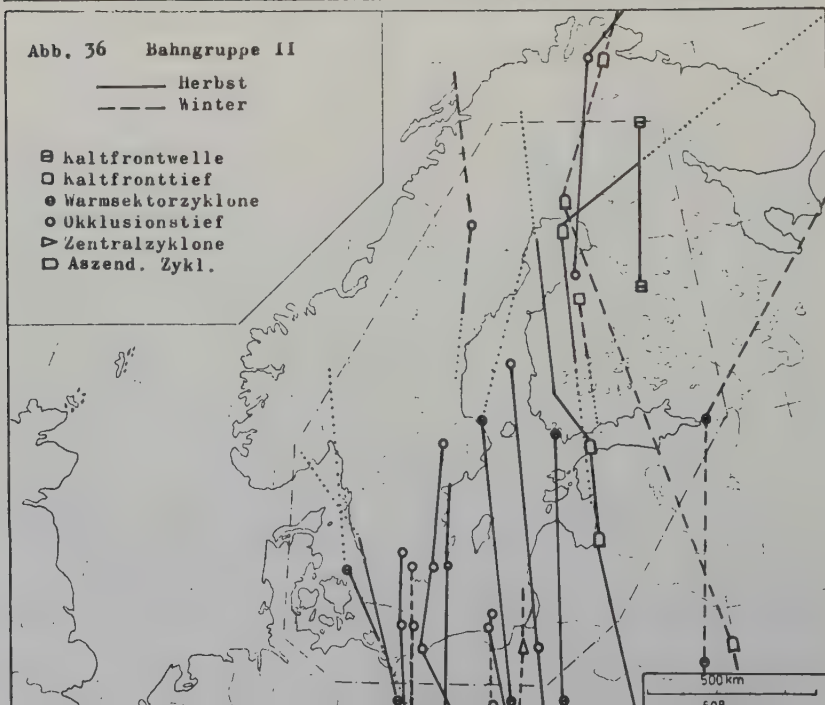
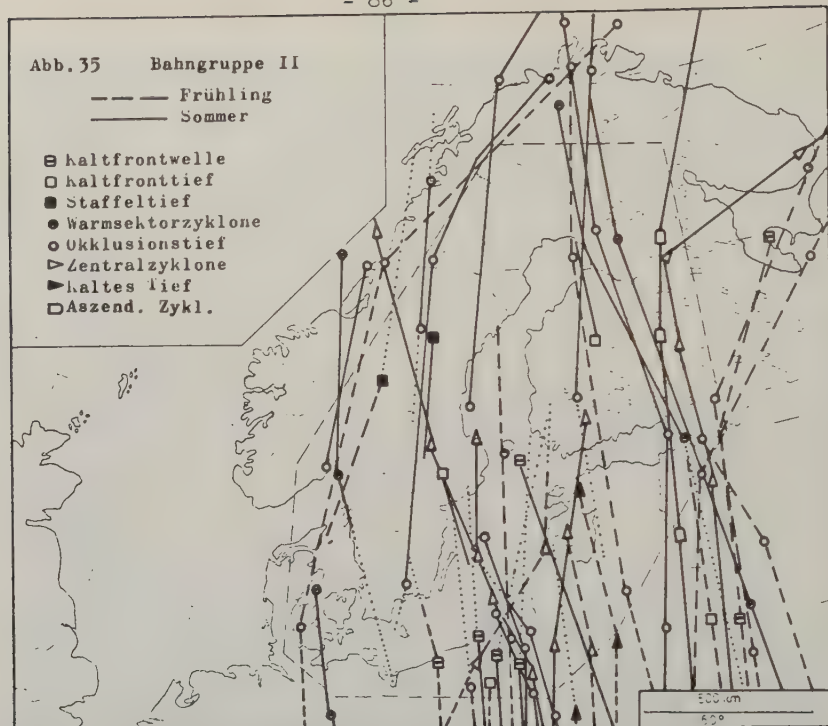
Liegt ein blockierendes Hoch über Osteuropa, dann wird auf der Rückseite des über Mitteleuropa lagernden Trogos Kaltluft nach Süden geführt, die auf der Nordseite des Alpenmassivs nach Osten umgelenkt wird. Über der böhmisch-mährischen Senke trifft sie im Sommer auf die stark erhitze Festlandluft, wo es infolge der Temperaturkontraste in der nach Norden gerichteten Divergenzzone zu einer intensiven Zyklongenese kommt (Vgl. R.SCHERHAG, 1936). Die Entstehungsursachen dieser Zyklonen ähnelt also derjenigen unserer Bahngruppe I; nur ist bei der BG II der für die Steuerung verantwortliche Trog mehr meridional ausgerichtet. An seiner Vorderseite wird die böhmisch-mährische Zyklone mit der vorherrschenden Südströmung in das Ostseegebiet gesteuert, wobei sie auf ihrem Weg fortwährend östliche Warmluft gegen die kalte Polarluft des Trogos aufgleiten läßt. Der dadurch verursachte anhaltende Landregen führt, besonders im Frühjahr zur Zeit der Schneeschmelze, zu den gefürchteten Hochwassern der Oder und Weichsel. Erreichen die Tiefs im Frühjahr, wenn die Temperaturgegensätze noch nicht ihre sommerlichen Extremwerte aufweisen,

die jetzt noch kalte Wasserfläche der Ostsee, so sterben sie mangels weiterer Energiezufuhr bald ab (Vgl. Abb. 35, S. 86). Im Sommer dagegen durchqueren viele Zyklonen das Ostseegebiet in seiner ganzen Länge, wobei die Bahnen jetzt weiter ostwärts verlaufen. Die aus dem blockierenden Rußlandhoch ausfließende Warmluft, die von den über Leningrad hinwegziehenden Zyklonen ins Ostseegebiet verfrachtet wird, verursacht über Finnland verbreitete Niederschläge, während das Baltikum von der auf der Rückseite einströmenden westlichen Maritimluft beeinflusst wird.

Die Tiefs, die im Frühling und Sommer innerhalb des Ostseeraumes selbst entstehen und die über Schweden nach Norden ziehen, unterscheiden sich genetisch von den oben beschriebenen Zyklonen. Bei ihnen handelt es sich um Randstörungen von Zentraltiefs nördlich der Britischen Inseln. Während der Kern liegenbleibt, driftet das Frontensystem in die südliche Ostsee, wo sich an ihm ein neuer Kern ausbildet, der an der Ostseite der Zyklonen nach Norden zieht und mit seinen Niederschlägen den mittleren Ostseeraum erfaßt. Liegt das Bezugstief weiter nördlich, und erstreckt sich von dort ein Trog bis nach Dänemark, dann wird zuweilen arktische Polarluft um die Südspitze Norwegens herumgeholt und wieder nach Norden verfrachtet. Diese Luftmasse bringt zwar nur einen geringen Temperaturrückgang, aber durch ihre labile Schichtung treten im Bereich hinter der Kaltfront über dem schwedischen Festland Schauer und Gewitter auf.

Im Herbst konzentrieren sich die Zugbahnen wieder mehr auf die Wasserfläche der Ostsee, wo die Zyklonen durch das warme Wasser einen Impuls zu kurzfristiger Vertiefung erhalten können. Obwohl auch die meisten von ihnen im Ostseeraum absterben, dringen sie wegen der größeren Erhaltungstendenz über dem Wasser weiter nach Norden vor als im Frühling (Vgl. Abb 36, S. 86). Die Häufigkeit beschränkt sich in dieser Jahreszeit auf die Monate Oktober und November, während der September wegen der über Mitteleuropa mit großer Regelmäßigkeit auftretenden Hochdrucklagen (Altweibersommer) mit nur einem Fall die geringste Häufigkeit aufweist (Vgl. Diagn. 9, S. 84).

Auf Grund der großen Zahl von Zyklonen, die im Ostseeraum absterben - Bahngruppe II weist nach I die meisten Auffüllungen auf - , konzentrieren sich die Intensitätsfaktoren überdurchschnittlich stark auf die geringen Werte (Vgl. Diagn. 10 S. 87). Wider alle Erwartung geht dabei der IF von 05/1 auf sommerliche



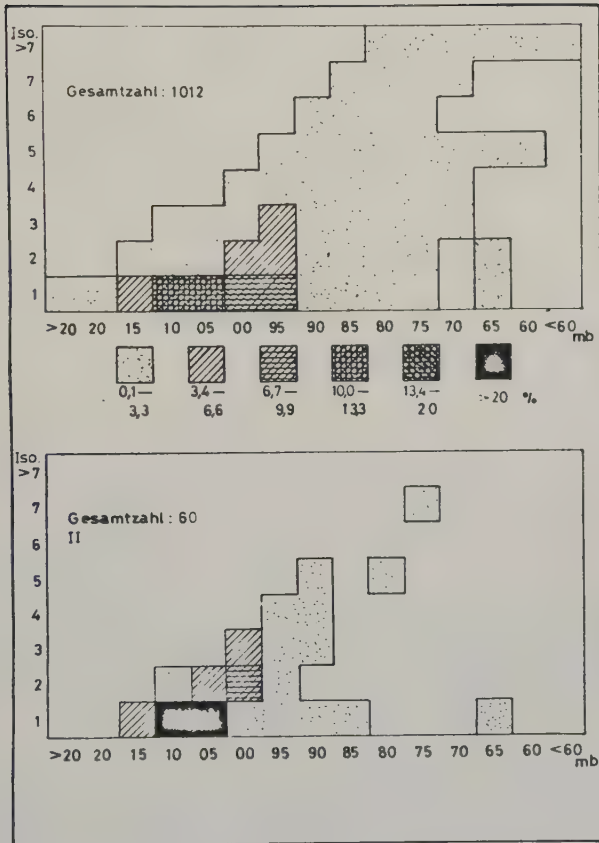


Diagramm 10 Verteilung der Intensitätsfaktoren

Zyklonen zurück, während im Herbst und Frühling die meisten Tiefs einen maximalen Wert von 10/1 aufweisen. Tiefere Zyklonen mit entsprechenden Windstärken kommen zwar vor, aber sie sind selten und ihre 24-stündigen Druckänderungen erreichen nicht die von R.SCHERHAG (1936) angegebenen Werte. Der Extremwert von 65/1 geht auf eine winterliche Resonanzbildung über Norrland zurück.

c. Bahngruppe III

Nicht nur die markante Abweichung in der Typenverteilung, sondern auch das ausgesprochene Minimum in der Bewegungsrichtung SSW/NNO (Vgl. Abb. 29, S. 71) trennt die Bahngruppe III von der letzten BG und weist sie als selbständige Einheit aus, obwohl sich die Zahl der Häufigkeiten fast gleicht.

Tabelle 10 Bahngruppe III

Tiefdrucktypen	Frühling	Sommer	Herbst	Winter	Jahr	%
Kaltfrontwelle	1	2	2	-	5	8,5
Kaltfronttief	2	2	2	2	8	13,0
Warmsektorzyklone	2	1	1	3	7	11,0
Okklusionstief	4	11	6	7	28	47,5
Zentralzyklone	1	-	-	-	1	1,5
Aszend. Zykl.	3	2	2	2	9	15,0
Summe	13	18	13	14	58	

Auch die Bahngruppe III weist, wie die Tabelle 10 zeigt, ein leichtes Sommermaximum auf, aber im Ganzen gesehen verläuft der Jahresgang im Gegensatz zu den ersten beiden Bahngruppen sehr viel ausgeglichener (Vgl. Diag. 11).

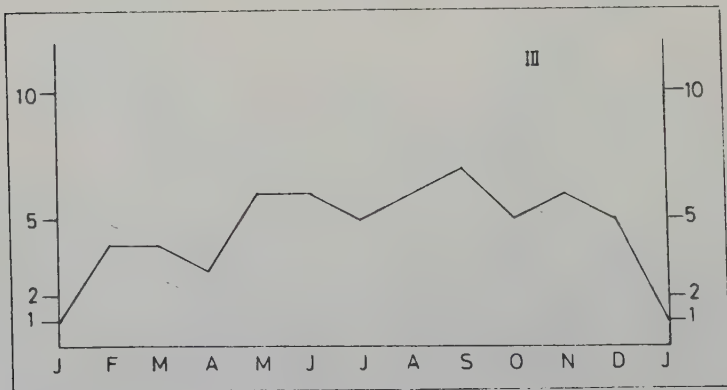


Diagramm 11 Jahresgang der Bahngruppe III

Bei einem Blick auf die Tabelle 10 (S. 88) fällt sofort die geringe Anzahl von Zentralzyklonen ins Auge. Hatte ihr Anteil an der letzten Bahngruppe noch mehr als 11 % betragen, so ist er jetzt auf weniger als 2 % zurückgegangen. Dies wird durch die Abbildungen 37/38 (S. 90) sofort verständlich, denn da die Bahngruppe III die Herkunftsrichtungen SSW bis SW umfaßt, kommen die Tiefdruckgebiete aus dem Kernraum Mitteleuropas, der wegen seiner grossen Landmasse weder für eine intensive Zyklogense noch für eine stärkere Vertiefung günstige Voraussetzungen liefert, so daß sich dort nur flache Tiefs wie Kaltfrontwellen oder Kaltfronttiefs bilden (Vgl. G. BAHRENBURG 1963, S. 53). So kommt die einzige Zentralzyklone nicht aus dem mitteleuropäischen Raum, sondern aus Südosteuropa, und berührt auf ihrer einen weiten Bogen beschreibenden Bahn das Ostseegebiet nur randlich im Südosten.

Auch die Zugbahnen von Bahngruppe III liegen noch auf der Vorderseite von Höhentritten über der Nordsee oder dem Nordmeer. Die Tiefdruckgebiete bilden sich entweder an zurückhängenden Kaltfronten von Kolazyklonen (Anfangsstadium: Kaltfrontwelle) oder an rechtwinklig zur Höhenströmung nach Nordosten driftenden Kaltfronten (Anfangsstadium: Kaltfronttief). Dieser Typ erreicht hier mit fast 13 % den höchsten Anteil an allen Bahngruppen. Beide Stadien verwirbeln schnell im Ostseeraum, so daß die Okklusionstiefs zu allen Jahreszeiten die größte Häufigkeit aufweisen. Da sie sich im späten Frühjahr und Sommer vornehmlich über der mittleren Ostsee konzentrieren, wird von der abkühlenden Wirkung der maritimen Polarluft auf ihrer Rückseite der südöstliche Untersuchungsraum am stärksten betroffen. Im Herbst und Winter ist die Streuung der Bahnen zwar grösser, aber auch dann wird hauptsächlich der Südosten von Polen bis Südfinnland von der Meeresluft beeinflusst, die zu diesen Jahreszeiten eine Temperaturerhöhung bis in den nordrussischen Raum hineinträgt.

Bildet man die Klassen a) Zentralzyklone, b) Aszendierende Zyklone und c) Rest und vergleicht Bahngruppe III mit II, dann ist der χ^2 -Wert mit 13,46 bei zwei Freiheitsgraden auf dem 0,1-Niveau signifiziert. An diesem hohen Wert ist hauptsächlich der starke Anteil von Aszendierenden Zyklonen beteiligt, der mit über 15 % sein Maximum bei der BG III erreicht. Die Vertiefung dieser Zyklonen erfolgt über der mittleren Ostsee durch einen Vorstoß

Abb. 37 Bahngruppe III

--- Frühling
— Sommer

- Kaltfrontwelle
- Kaltfronttief
- Warmsektorzyklone
- Okklusionstief
- ▽ Zentralzyklone
- Aszend. Zykl.

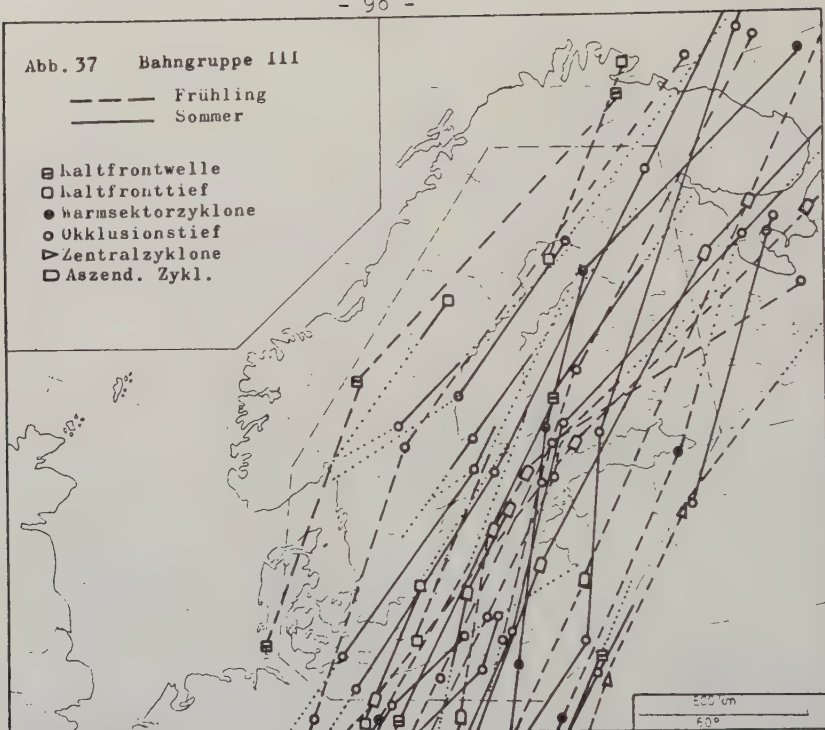
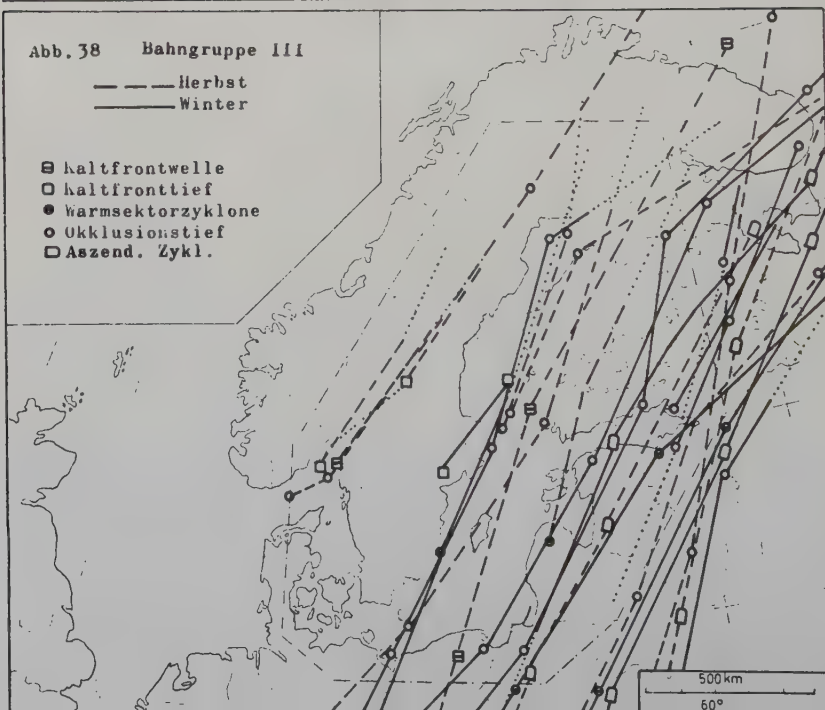


Abb. 38 Bahngruppe III

--- Herbst
— Winter

- Kaltfrontwelle
- Kaltfronttief
- Warmsektorzyklone
- Okklusionstief
- Aszend. Zykl.



hochreichender Kaltluft auf ihrer Rückseite. Im Frühjahr verursacht dieser Kaltlufteinbruch über dem Baltikum neben stürmischen Westwinden Schauerniederschläge und mitunter Gewitter, während es im nördlichen Ostseeraum bei Nord- bis Nordostwinden vor der Warmfront noch Mitte Mai zu verbreiteten Schneefällen kommen kann. - Während der Monate Juni bis August treten keine Aszendierenden Zyklonen auf, so daß jetzt die Okklusionstiefs vorherrschen. Erst Anfang September setzen sich wieder Tiefs bis ins 500 mb-Niveau durch und beeinflussen mit ihrer aus Nordosten herantransportierten Festlandluft Mittelschweden zyklonal. Auch im Spätherbst und Winter, wenn die Bahnen der Aszendierenden

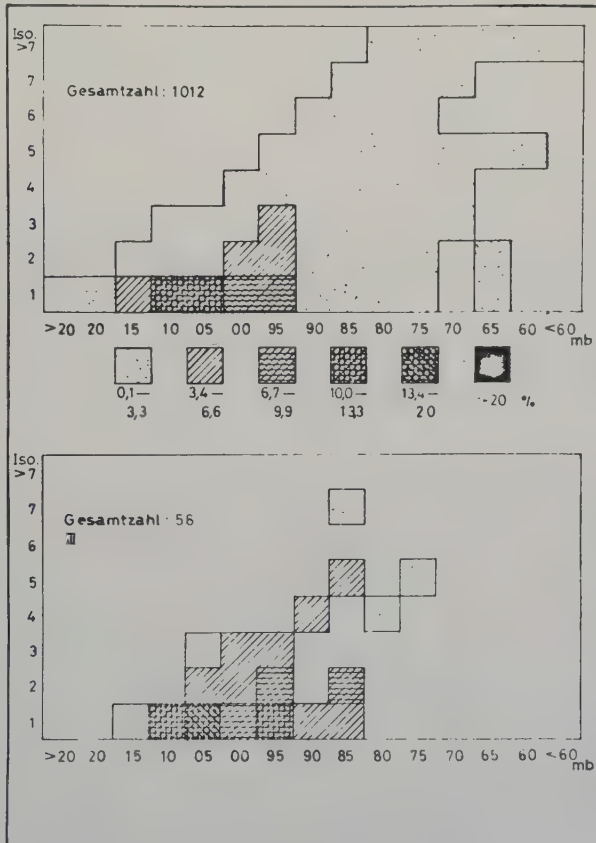


Diagramm 12 Verteilung der Intensitätsfaktoren

Zyklonen weiter ostwärts verlaufen, wird das nördliche Ostseegebiet mehr von der präfrontal einfließenden kalten Kontinentalluft aus Nordosten als durch das okkludierte Frontensystem beeinflusst.

Durch den hohen Anteil an Aszendierenden Zyklonen sind bei Bahngruppe III die größeren Intensitätsfaktoren sehr viel stärker vertreten als es dem Durchschnitt entspricht (Vgl. Diagr. 12 S. 91). Die tiefen Kerndrücke werden dabei im Winter und Frühling erreicht, wenn die zur Vertiefung notwendige polare Kaltluftproduktion weiter fortgeschritten ist. Die Intensität der Zyklonen nimmt auf ihrem Weg nach Norden meist noch zu, so daß viele Zyklonen erst über dem Weißen Meer ihre maximale Größe erreichen (Vgl. S.EVJEN 1953, S. 237). - Obwohl die meisten Tiefs eine mittlere Wanderungsgeschwindigkeit aufweisen, liegt der GK mit -1,82 etwas unter dem Durchschnitt.

d. Bahngruppe IV

Während es sich bei den Bahngruppen I bis III um reine Kontinentalbahnen handelt, beginnen mit der Bahngruppe IV die maritimen Bahnen. Mit der zunehmenden westlichen Komponente in der Bewegungsrichtung verlagert sich das Ursprungsgebiet der Tiefs immer mehr in den Atlantik bzw. in die Nordsee, so daß die Nordwestecke des Kontinents nur noch randlich berührt wird.

Tabelle 11 Bahngruppe IV

Tiefdrucktypen	Frühling	Sommer	Herbst	Winter	Jahr	%
Kaltfrontwelle	1	4	2	2	9	10,0
Kaltfronttief	5	5	1	1	12	13,0
Staffeltief	1	-	-	-	1	1,0
Warmsektorzyklone	6	8	2	4	20	22,0
Okklusionstief	3	8	7	8	26	28,5
Warmfrontwelle	2	-	-	-	2	2,0
Zentralzyklone	2	4	1	1	8	9,0
Kaltes Tief	-	1	-	1	2	2,0
Deszend. Zykl.	-	-	-	1	1	1,0
Aszend. Zykl.	4	3	2	2	11	12,0
Summe	24	33	15	20	92	

Bahngruppe IV unterscheidet sich in den Klassen a) Okklusionstief, b) Warmsektorzyklone und c) Rest bei einem χ^2 -Wert von 43,03 signifikant von der Typenverteilung der Bahngruppe III, wobei die größten Unterschiede in den Klassen a) und b) liegen. Bei dieser Bahngruppe treten nicht nur Deszendierende Zyklonen und Kalte Tiefs wieder auf, sondern auch die Zahl der vollentwickelten Zentralzyklonen ist gegenüber III stark angestiegen. Da das Maximum ihres Auftretens in den Sommer fällt, ist es wohl weniger die Energiezufuhr der in dieser Jahreszeit recht kalten Nordsee als vielmehr der Einbruch polarer Kaltluft auf ihrer Rückseite, der die Tiefs als hochreichende Wirbel das Ostseegebiet erreichen läßt.

Der Jahresgang ähnelt stark denen der Bahngruppen I und II; denn neben einem Minimum im Herbst weisen alle drei Bahngruppen ein ausgeprägtes Sommermaximum auf. Bei der Bahngruppe IV entfallen allein auf den August 17 Tiefdruckgebiete (Vgl. Diagr.13), so daß man auch diese Bahngruppe als eine typisch sommerliche Erscheinung ansehen kann.

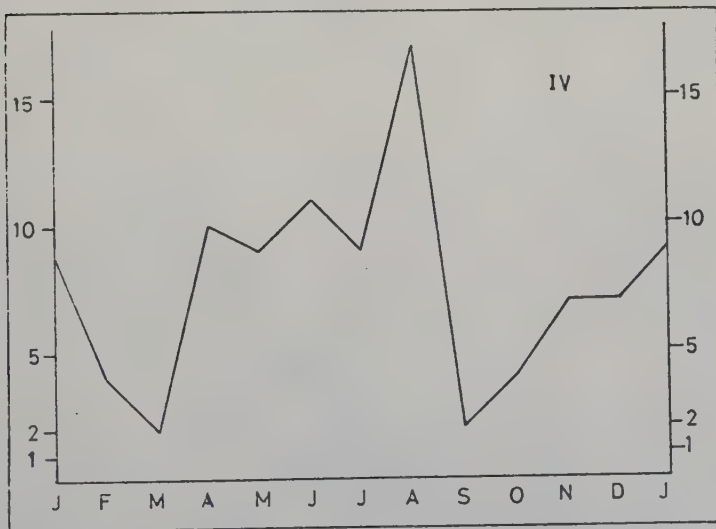


Diagramm 13 Jahresgang der Bahngruppe IV

Abb. 39 Bahngruppe IV

Frühling

- Kaltfrontwelle
- Kaltfronttief
- Staffeltief
- Warmsektorzyklone
- Okklusionstief
- △ Warmfrontwelle
- ▽ Zentralzyklone
- Aszend. Zykl.

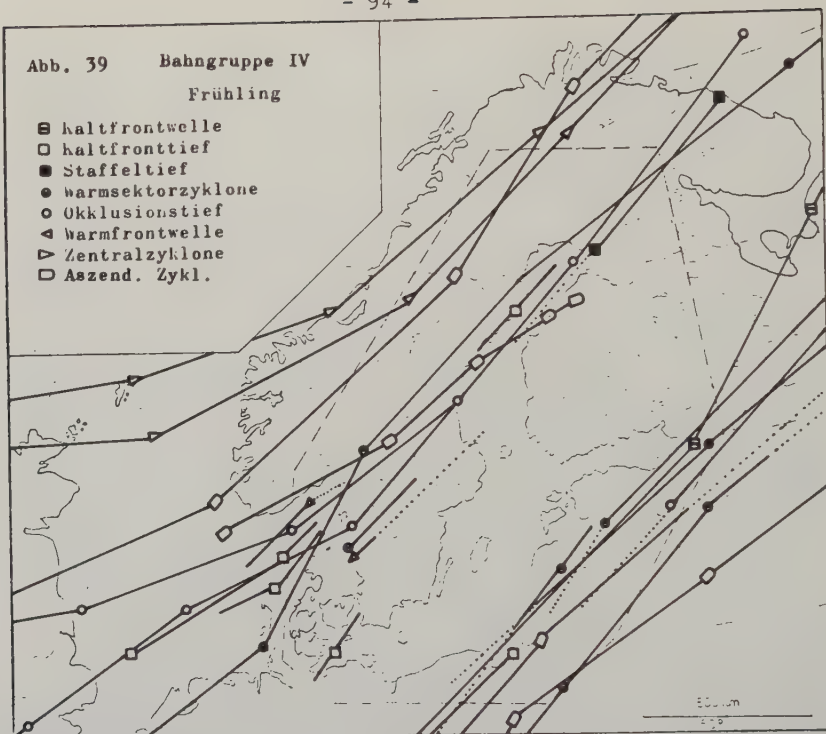
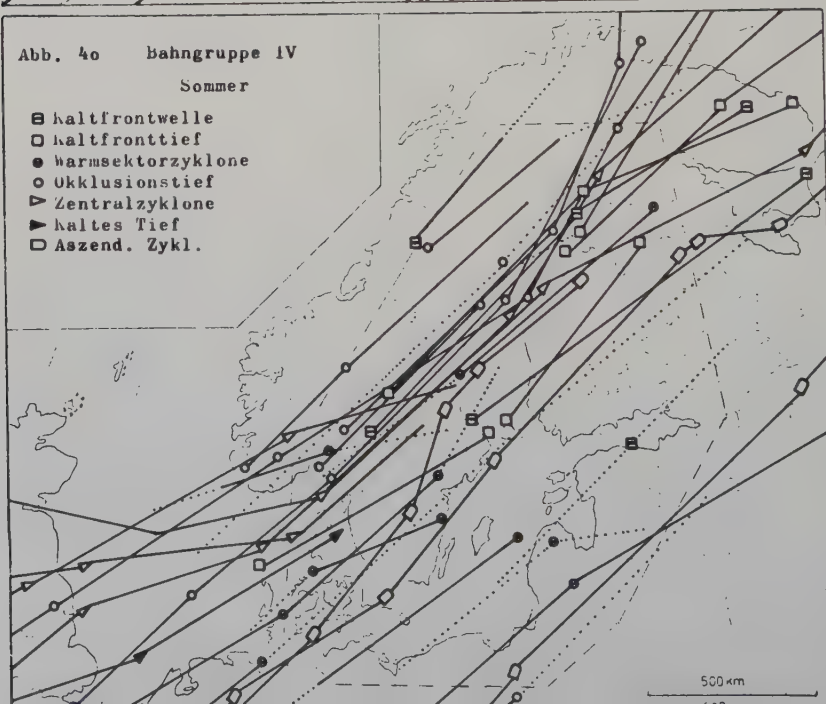


Abb. 40 Bahngruppe IV

Sommer

- Kaltfrontwelle
- Kaltfronttief
- Warmsektorzyklone
- Okklusionstief
- ▽ Zentralzyklone
- ▲ kaltes Tief
- Aszend. Zykl.



Im Frühling (Vgl. Abb. 39, S. 94) weist Bahngruppe IV eine ausgeprägte Zweiteilung auf, da die stabilisierende Wirkung des kalten Ostseewassers nördlich und südlich umgangen wird. Der südliche Bahnstreifen wird frequentiert, wenn ein Trog mit NO/SW-Erstreckung über Skandinavien liegt und die Tiefs auf seiner Vorderseite über Mitteleuropa hinweg nach Nordrußland gesteuert werden. Da diese Bahnen ausschließlich über Land führen, ist die Tendenz zur Verwirbelung nicht sehr stark, so daß sich hier die Mehrzahl der Warmsektorzyklonen findet. Sie treten alle im April auf und verursachen von Estland bis Finnland präfrontale Schneefälle. Im Gegensatz zum südlichen beeinflussen die Zyklonen des nördlichen Bahnstreifens, dessen Begehung an einen Trog vor Nordwesteuropa gebunden ist, mit ihrer Rückseitenkaltluft das gesamte Ostseegebiet. Im Sommer ist die Zweiteilung einer starken Massierung der Tiefdruckgebiete auf der Linie Skagerrak-Botterwiek gewichen (Vgl. Abb. 40, S. 94). Hier macht sich der Eckeneffekt des südnorwegischen Berglandes bemerkbar; denn die Bewegung der Kaltfronten wird in ihrem nördlichen Teil gehemmt, während der südliche Teil ungehindert nach Osten vorstößt, so daß es hinter dem Gebirgsvorsprung zu einer orographisch bedingten Zyklogenese kommt. Durch die Neubildung wird östliche Warmluft eingewirbelt, die über Schweden zu Aufgleitniederschlägen führt.

Nicht nur die Neubildungen, sondern auch die gealterten Zyklonen führen von Dänemark bis Südfinnland zu Niederschlägen, so daß die Zyklonen dieser Bahngruppe mit ihrem ausgeprägten Maximum im August vornehmlich daran beteiligt sein dürften, daß für diese Gebiete der August zum regenreichsten Monat wird. - Neben dem Skagerrak geht auch von der Bottenwiek eine zyklogenetische Wirkung aus, aber während die im Skagerrak entstandenen Zyklonen wegen des Eckeneffektes leichter verwirbeln, bleiben sie hier im Zustand des Kaltfronttiefs.

Im Herbst verlagert sich die zyklonale Aktivität stärker auf das Nordmeer, so daß die Bahngruppe IV jetzt ihr Minimum aufweist. Die einzelnen Zugbahnen sind dabei über das ganze Ostseegebiet gestreut (Vgl. Abb. 41, S. 96). Mit Ausnahme der Resonanzbildungen, die östlich des Gebirges entstehen, wenn vor Norwegen eine Zentralzyklone nach Nordosten zieht, ist der Kerndruck des Tiefs relativ hoch, so daß sie wenig lebensfähig sind. Erst im Winter treten wieder vermehrt Zyklonen auf, die den Raum in seiner ganzen Ausdehnung durchqueren (Vgl. Abb. 42, S.96).

Abb. 41 Bahngruppe IV

Herbst

- Kaltfrontwelle
- Kaltfronttief
- Warmsektorzyklone
- Okklusionstief
- ▽ Zentralzyklone
- Ascend. Zykl.

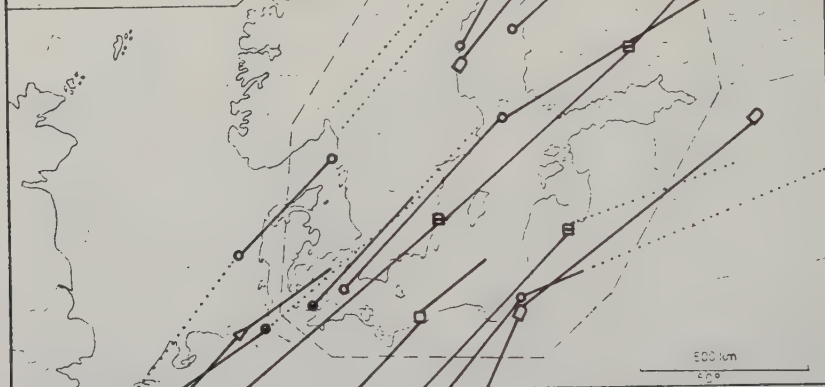
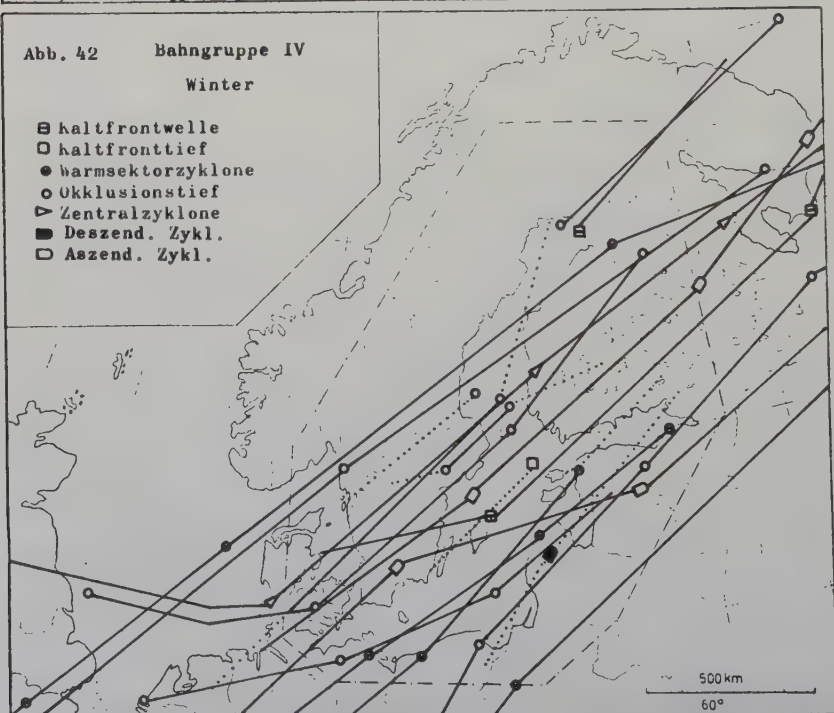


Abb. 42 Bahngruppe IV

Winter

- Kaltfrontwelle
- Kaltfronttief
- Warmsektorzyklone
- Okklusionstief
- ▽ Zentralzyklone
- Deszend. Zykl.
- Ascend. Zykl.



Die Zugbahnen konzentrieren sich in auffälligem Gegensatz zum Frühjahr nahezu ausschließlich auf das Gebiet der südlichen und mittleren Ostsee, wo sie von der Unterlage her die größte Energiezufuhr erhalten können. Während der südliche Ostseeraum durch die aus Südwesten herantransportierte Maritimluft eine relative Erwärmung und Schneefall erfährt, verbleiben Nordschwe- den und Lappland unter einer widerständigen Kaltluft- haut. Nur zuweilen wird Maritimluft soweit herumgeholt, daß es beim Auf- gleiten über diesem Gebiet zu Schneefällen kommt.

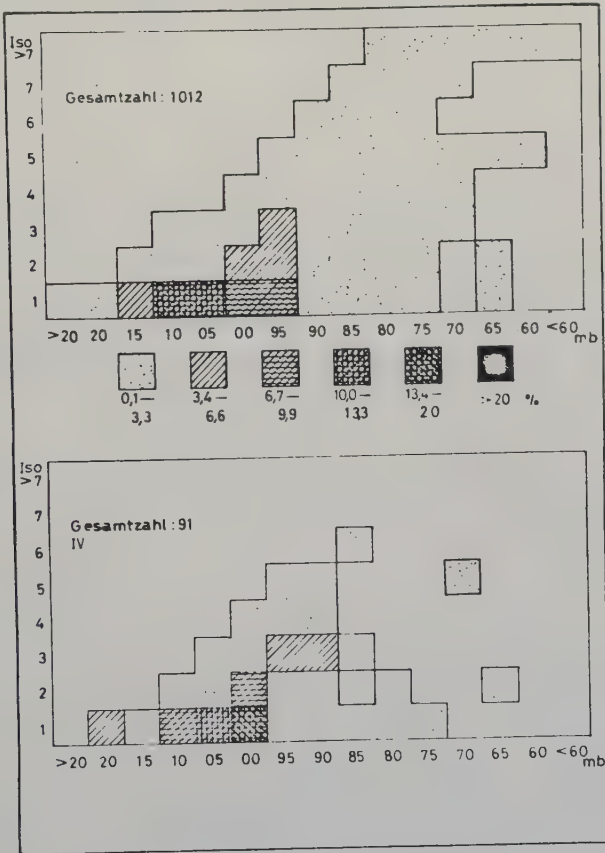


Diagramm 14 Verteilung der Intensitätsfaktoren

Da die meisten Zyklonen 600 - 1200 km pro Tag zurücklegen, ergibt sich ein durchschnittlicher GK von 2,05. -In der Verteilung der Intensitätsfaktoren kommt der relativ große Anteil der Kaltfrontwellen und Kaltfronttiefs zum Ausdruck, denn der Wert von 00/1 ist überdurchschnittlich stark vertreten (Vgl. Diagr. 14, S. 97). Bei dem IF von 65/2 handelt es sich um eine Aszendierende Zyklone, die im Spätherbst über Norland an der Okklusion eines Nordmeertiefs entsteht und die unter Vertiefung über der Bottenwiek ein eigenes Höhentief ausbildet. Die mit stürmischen Winden auf ihrer Südseite vorrührende maritime Warmluft bewirkt einen kräftigen Anstieg der Bodentemperaturen bis nach Rußland hinein.

e. Bahngruppe V

Bei der Bahngruppe V hat sich das steuernde Tief mehr nach Nordosten verlagert, so daß die Frontalzone über dem Ostseeraum stärker zonal ausgerichtet ist. Infolge der mehr westlichen Komponente in der Bewegungsrichtung nimmt neben der absoluten Häufigkeit auch die Zahl der okkludierten Zyklonen gegenüber BG IV noch zu. Allerdings ist die Abweichung in der Typenverteilung nicht so ausgeprägt, als daß sich ein signifikanter Unterschied ergäbe. Auch das herausragende Sommermaximum mit dem Augustgipfel weist auf eine enge Verwandtschaft mit der BG IV hin. Dennoch erschien eine Trennung in zwei Bahngruppen geboten, da die Herkunftsrichtungen sich in stärkerem Maß von denen der BG IV unterscheiden.

Tabelle 12 Bahngruppe V

Tiefdrucktypen	Frühling	Sommer	Herbst	Winter	Jahr	%
Kaltfrontwelle	1	3	6	3	13	12,5
Kaltfronttief	2	10	1	-	13	12,5
Warmsektorzyklone	4	3	-	3	10	9,5
Okklusionstief	15	10	15	5	45	43,0
Zentralzyklone	3	4	2	-	9	8,5
Deszend. Zykl.	1	2	-	-	3	3,0
Aszend. Zykl.	1	4	4	3	12	11,5
Summe	27	36	28	14	105	

Im Frühling läßt sich die klare Zweiteilung unter Aussparung der südlichen und mittleren Ostsee, wie sie die Bahngruppe IV zeigte, nicht mehr erkennen (Vgl. Abb. 43, S. 99). Die Zugbahnen

Abb. 43 Bahngruppe V
Frühling

- haltfrontwelle
- haltfronttief
- warmsektorzyklone
- Okklusionstief
- ▽ Zentralzyklone
- Deszend. Zykl.
- Aszend. Zykl.

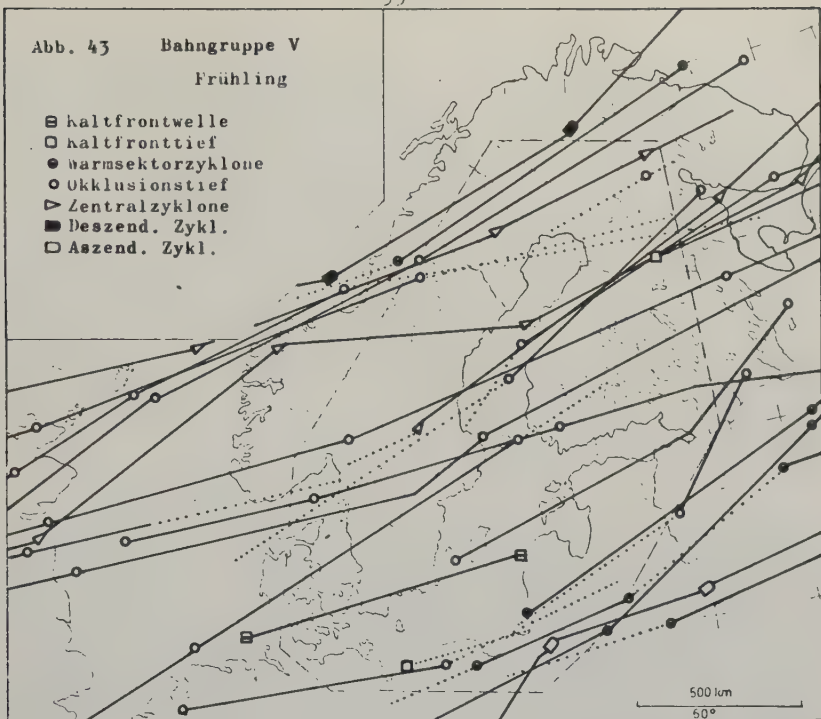
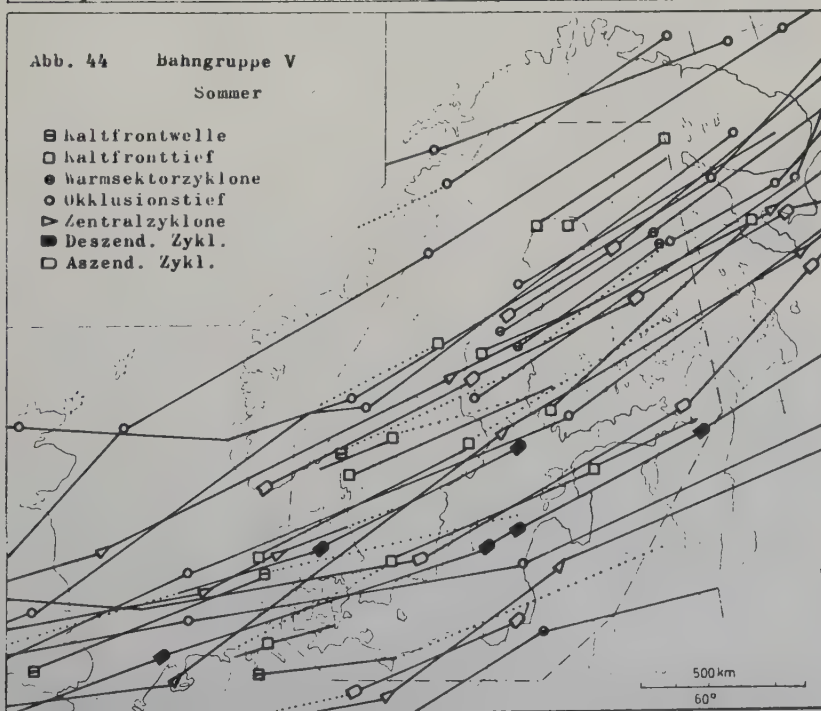


Abb. 44 Bahngruppe V
Sommer

- haltfrontwelle
- haltfronttief
- warmsektorzyklone
- Okklusionstief
- ▽ Zentralzyklone
- Deszend. Zykl.
- Aszend. Zykl.



sind hier gleichmäßiger über das gesamte Gebiet gestreut, wobei sich kleinere Bündelungen über Lappland, Mittelschweden/Finnland und Ostpreußen ergeben, die aber in der Typenverteilung keinen signifikanten Unterschied aufweisen. Während der südliche Bahnstreifen das Ostseegebiet nur noch randlich berührt, beeinflusst der mittlere und nördliche Bahnstreifen besonders Dänemark, Süd- und Mittelschweden und Südfinnland zyklonal. Hat im März und April die aus Südwesten herangebrachte Maritimluft für diese Gebiete noch einen erwärmenden Effekt, so kehrt sich im Mai die Temperaturverteilung um. In diesem Monat beginnt sich das Festland durch die verstärkte Einstrahlung sehr rasch zu erwärmen, so daß die Tiefs, die im Mai mit 13 Fällen fast das Monatsmaximum erreichen (Vgl. Diagr. 15) mit ihrer kühlen Meeresluft jetzt einen Temperaturrückgang verursachen. Neben Schauern kommt es beim Durchzug der Kaltfronten auch schon zu vereinzelt Gewittern. Stellt sich beim nördlichen Bahnstreifen auf der Rückseite der Tiefs eine nordöstliche Bodenströmung ein, dann erfährt Lappland von Anfang April an eine advektive Temperaturerniedrigung durch arktische Kaltluft, die in ihrem Quellgebiet jetzt die tiefsten Ausgangstemperaturen aufweist (Vgl. J. BLÜTHGEN, 1940).

Im Sommer kommt eine Ähnlichkeit der Bahngruppen IV und V zum Ausdruck in der Drängung der Zugbahnen im mittleren Ostseegebiet, in dem ausgeprägten Augustmaximum und in der erhöhten

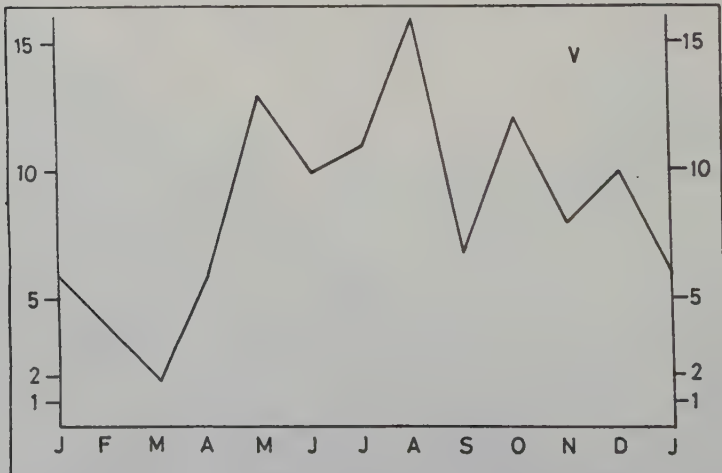
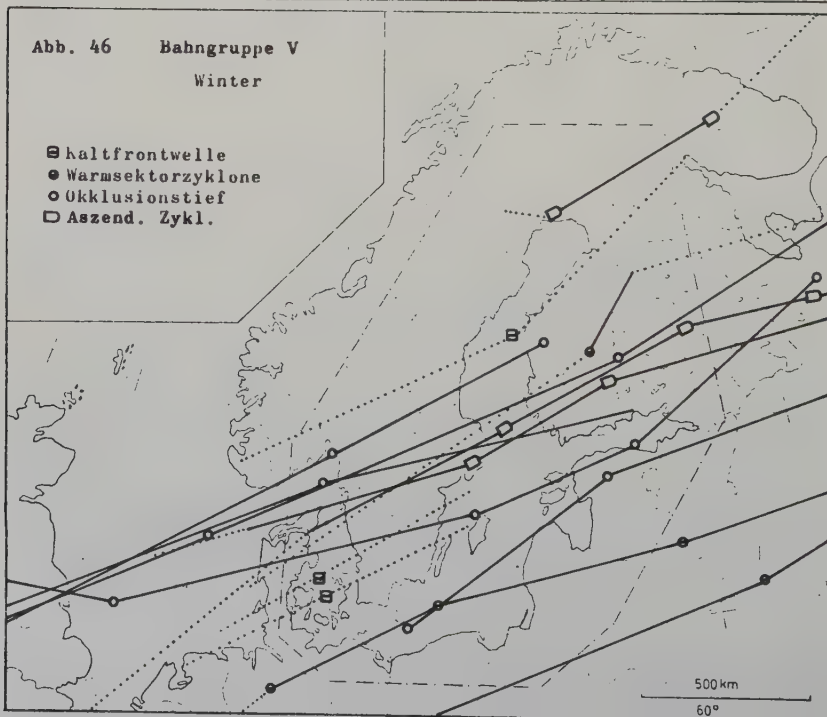
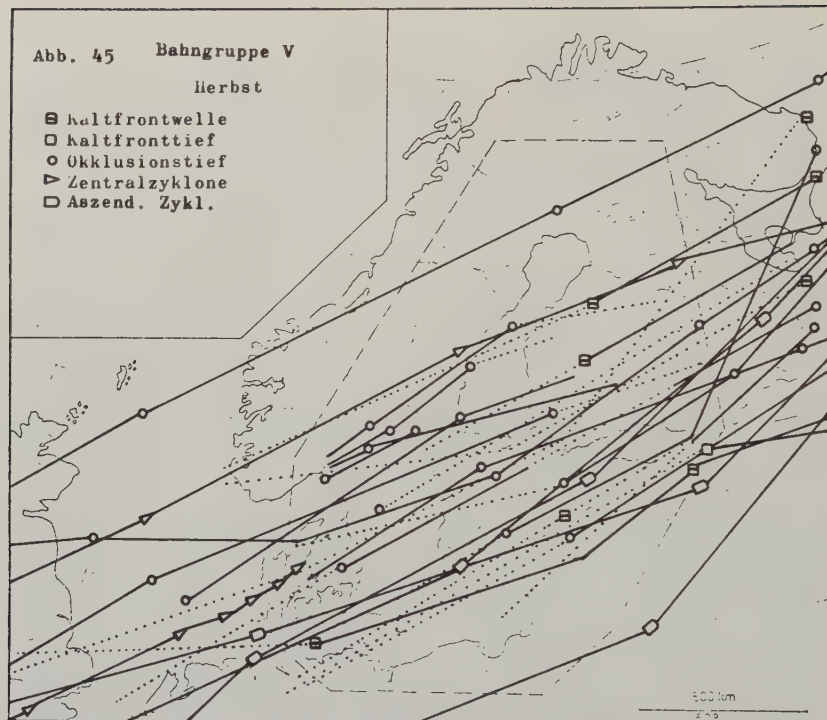


Diagramm 15 Jahresgang der Bahngruppe V

Häufigkeit von hochreichenden Zyklonen. Diese Tiefdruckgebiete, die in ihrer kräftigen Ausprägung einen Kerndruck von 985 mb noch unterschreiten können, holen auf ihrer Rückseite arktische Polarluft um die Südspitze Norwegens herum in das Ostseegebiet, wo sie mit kräftig auffrischenden Winden eintrifft und neben advektiver Abkühlung zu kräftigen Schauern führt. Neben den hochreichenden Zyklonen sind es besonders die Kaltfrontttiefs, deren Häufigkeit in dieser Jahreszeit auffällt (Vgl. Tab. 12, S. 98). Sie entstehen durch Verwirbelung an Kaltfronten und Kaltfront-okklusionen von Nordmeerzyklonen, sind relativ schwach entwickelt und unterschreiten mit ihrem Kerndruck selten 1000 mb. Während es in ihrem Zentrum nur zu leichten Aufgleitniederschlägen kommt, geht die eigentliche zyklonale Beeinflussung von den Fronten aus, hinter denen es über dem erhitzten Land zu reger Schauer- und Gewittertätigkeit kommt.

Im Gegensatz zu BG IV nimmt bei V die zyklonale Aktivität im Herbst kräftig zu, wobei der Schwerpunkt in den Oktober fällt (Vgl. Diag. 15, S. 100). Lag das durchschnittliche Kerndruckminimum bei IV noch um 1000 mb, so ist es jetzt unter 995 mb abgesunken, so daß wegen ihrer kräftigen Entwicklung mehr Tiefdruckgebiete das gesamte Ostseegebiet durchqueren (Vgl. Abb. 45, S. 102). Obwohl sie schon okkludiert sind, bringen sie auf ihrer Südseite milde Meeresluft bis in die östlichen Teile des Ostseeraumes. - Stößt zu vorgerückter Jahreszeit auf der Rückseite arktische Polarluft nach Süden vor, dann können sich die Zyklonen zu starken Sturmwirbeln für die südliche Ostsee entwickeln, wie es am 6. Dezember 1961 der Fall war, als eine von England kommende Zentralzyklone erst über Norrland ihren tiefsten Druck (965 mb) erreichte. Hinter diesem Tief brach die Arktikluft bei steilem Druckgradienten mit Schneeschauern und stürmischen Westwinden in das mittlere Ostseegebiet ein.

Wurde im Winter bei Bahngruppe IV der südliche Raum in größerer Breite von Tiefdruckgebieten überzogen, so konzentrieren sie sich bei V mehr auf die mittelschwedische Senke (Vgl. Abb. 46, S. 102); gleichzeitig erreicht BG V in dieser Jahreszeit ihr Frequenzminimum. Nur die südlichen Gebiete werden von den Zyklonen jetzt beeinflusst. Dabei kann es vorkommen, daß selbst im Februar bei positiven Temperaturen die Schneedecke weit nach Osten zurückgedrängt wird, so daß Polen und das Baltikum schneefrei sind.



Wegen der mehr westlichen Herkunftsrichtung der Zyklonen liegt der GK mit 2,09 noch etwas höher als bei BG IV. - In der Verteilung der Intensitätsfaktoren treten jetzt erstmals die größeren Werte ($< 95/2$) gehäuft auf (Vgl. Diag. 16). Es handelt sich dabei um herbst- und winterliche Zyklonen mit Höhentiefs, deren Durchzug fast immer mit kräftigen Stürmen aus Nordwest bis Südwest verbunden ist.

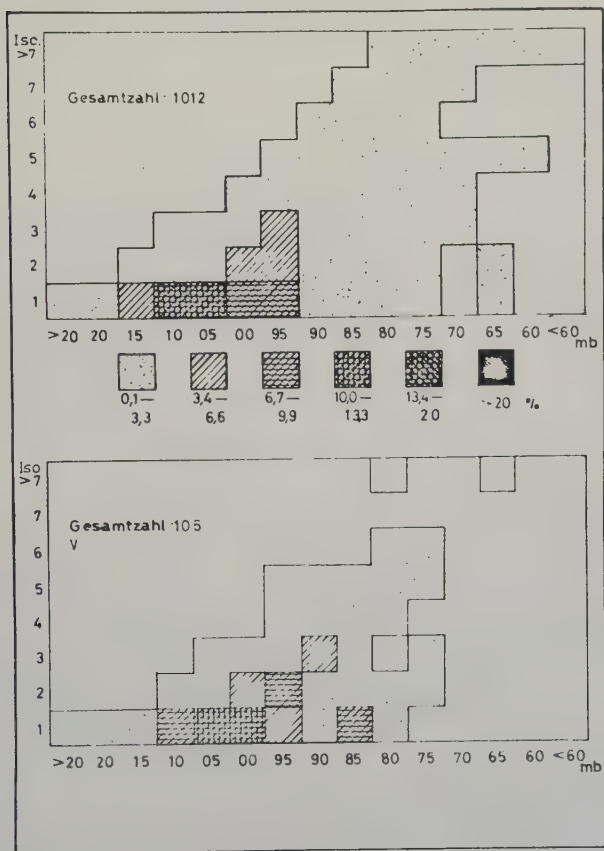


Diagramm 16 Verteilung der Intensitätsfaktoren

f. Bahngruppe VI

Betrachtet man noch einmal die Abbildung 30 (S. 75), kann man feststellen, daß die absolute Zahl der Tiefs zwischen V und VI zurückgeht. Schon aus rein numerischen Gründen könnte man hier eine Abgrenzung zur Bahngruppe VI ziehen, aber erst die Wertung der vertikalen Struktur, wie sie im χ^2 -Test zum Ausdruck kommt, macht deutlich, daß der relativ schmale Streifen als eigene Bahngruppe behandelt werden muß. Bildet man die beiden Klassen a) Zyklonen mit Höhentief und b) Rest, dann zeigt der χ^2 -Wert von 10,7 bei einem Freiheitsgrad an, daß BG VI sich mit 99,9 % Wahrscheinlichkeit in der Typenverteilung von BG V unterscheidet.

Tabelle 13 Bahngruppe VI

Tiefdrucktypen	Frühling	Sommer	Herbst	Winter	Jahr	%
Kaltfrontwelle	4	-	1	2	7	9,0
Kaltfronttief	2	3	3	-	8	11,5
Warmsektorzyklone	1	-	1	2	4	5,0
Okklusionstief	8	5	7	8	28	35,5
Zentralzyklone	2	6	-	3	11	14,0
Kaltes Tief	-	3	2	-	5	6,5
Deszend. Zykl.	1	2	1	3	7	9,0
Aszend. Zykl.	2	2	1	2	7	9,0
Summe	20	21	16	20	77	

Das Charakteristische dieser Bahngruppe ist ihr hoher Anteil an Zyklonen mit Höhentief, der hier mehr als 38 % ausmacht und damit das Maximum von allen gestreckten Bahngruppen erreicht. Mit dieser Typenverteilung kann man diese Bahngruppe als ausgesprochen maritim bezeichnen, zumal die Masse der Zyklonen ihren Weg innerhalb eines Streifens nimmt, der im Norden durch das südnorwegische Gebirge und im Süden durch die kontinentalen Landmassen begrenzt wird (Vgl. Abb. 47/48, S. 105). Innerhalb dieses Streifens führen die Zugbahnen von England her über die freien Wasserflächen der Nord- und Ostsee, und auch die in diesen Streifen hineinragenden Halbinseln von Dänemark und Südschweden stellen den Tiefdruckgebieten keinen nennenswerten Widerstand entgegen, so daß sie nahezu ungehindert den russischen Raum erreichen können.

Abb. 47 Bahngruppe VI

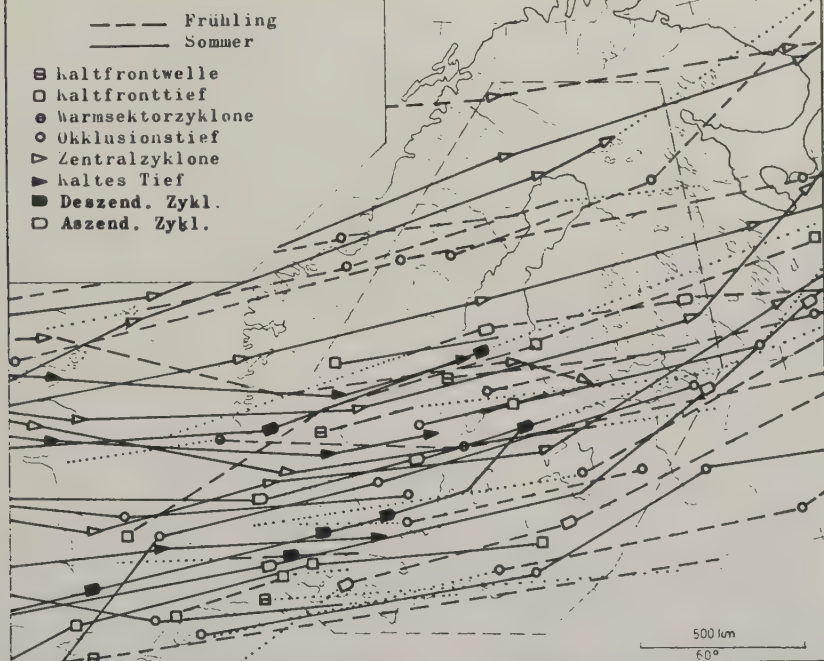
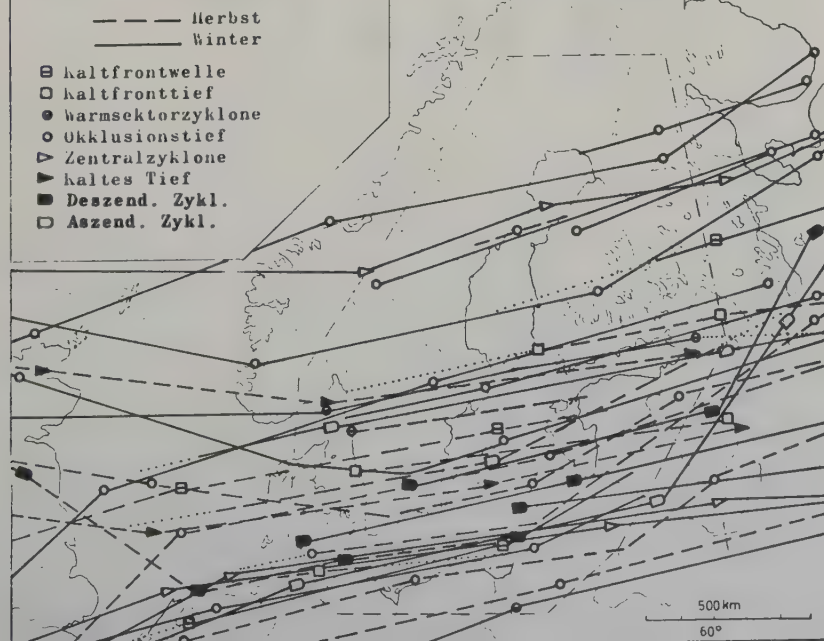


Abb. 48 Bahngruppe VI



Auch der lokale Einfluß des Ostseegebietes, der sich bei den Bahngruppen IV und V in einer größeren Anzahl von Neubildungen ausdrückte, ist hier nahezu gänzlich geschwunden. Die meisten Zyklonen ziehen von Westen in das Ostseegebiet hinein und durchqueren es in seiner gesamten Breite, was auf eine größere Erhaltungstendenz hinweist. - Auf Grund der Neigung, über den Wasserflächen stärker zu verwirbeln, zeigt sich bei den Warmsektorzyklonen der Bahngruppe VI ein relatives Minimum, das von keiner anderen Bahngruppe unterschritten wird. Diese Tendenz schlägt sich auch in der Verteilung der Intensitätsfaktoren nieder, indem auf der BG VI als einziger von allen gestreckten Bahngruppen keine Tiefdruckgebiete wandern, deren tiefster Kerndruck über 1010 mb.

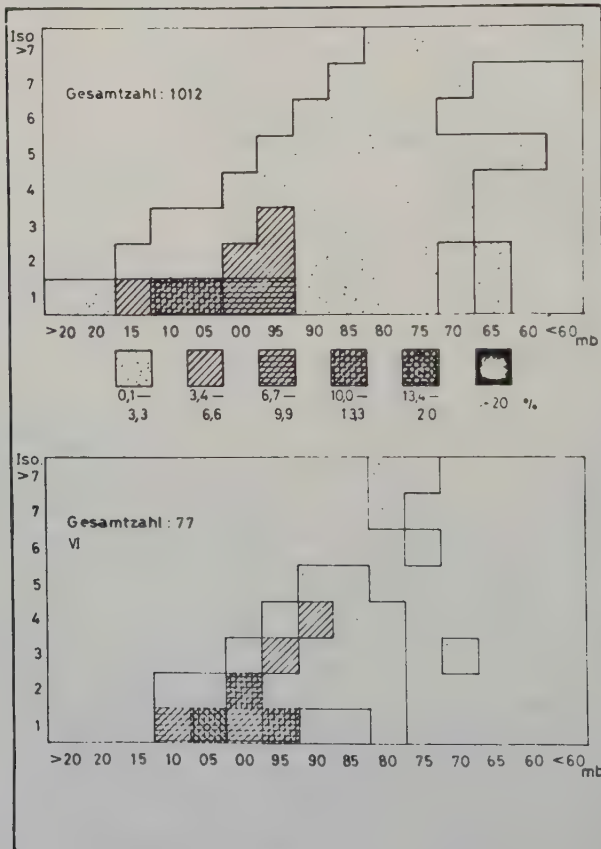


Diagramm 17 Verteilung der Intensitätsfaktoren

liegt (Vgl. Diagr. 17). Neben einer überdurchschnittlichen Besetzung der Werte 00/2, 95/1 und 90/4 ist der treppenartige Anstieg der IF von links unten nach rechts oben fast immer um einen Wert nach rechts verschoben. Das heißt, daß bei einer bestimmten Isobarenzahl der zugehörige Kerndruck jeweils um 5 mb tiefer liegt als beim Durchschnitt aller Tiefdruckgebiete. In dieser Verteilung zeigt sich, daß die Tiefdruckgebiete der Bahngruppe VI im Durchschnitt von allen gestreckten Bahngruppen die größte Intensität aufweisen. - Auch in der Geschwindigkeit der Zyklonen dieser Bahngruppe zeigt sich die kräftige Ausbildung der Tiefs; denn obwohl mehr als 38 % in der Höhe verankert sind und damit naturgemäß langsamer wandern, liegt der GK mit einem Wert von 2,00 höher, als man es auf Grund der Typenverteilung erwarten würde.

Das Sommermaximum der beiden letzten Bahngruppen ist bei Bahngruppe VI einem relativ ausgeglichenen Jahresgang gewichen, dessen Schwankungen nur noch zwischen 11 (April) und 2 Fällen (November) liegt (Vgl. Diagr. 18).

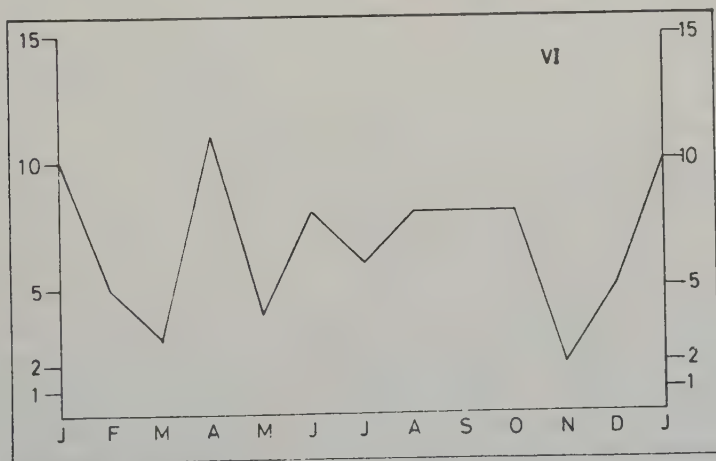


Diagramm 18 Jahresgang der Bahngruppe VI

Die meisten Zyklonen der Bahngruppe VI werden von einem Zentraltief über dem Nord- bzw. Eismeer gesteuert, aber gleich an zweiter Stelle stehen die Lagen mit hohem Druck über Mittel- und Südosteuropa, bei denen sich die Tiefs an der Nordabdachung des Hochs oder Hochkeile nach Osten bewegen.

Ihre größte Breitenausdehnung erreicht die Bahngruppe im Frühling, in den auch das Monatsmaximum fällt (Vgl. Diagr. 18, S. 107). Da die okkludierten Zyklonen in dieser Jahreszeit vorherrschen, wird durch die aus der abgehobenen maritimen Warmluft fallenden Niederschläge der mittlere Ostseebereich am stärksten betroffen, während der Warmsektor im Süden außerhalb des Gebietes vorbeizieht. Stellt sich hinter dem abziehenden Tief eine nördliche Störung ein, dann kommt es, besonders gegen Ende der Jahreszeit, im Hinterland der deutschen und polnischen Küsten zu Schauern und Gewittern. An der Küste selbst macht sich besonders im Mai der den Temperaturanstieg verzögernde Einfluß des kalten Ostseewassers bei nördlichen Winden stark bemerkbar. - Auch im Sommer sind Schauer und Gewitter in den Gebieten südlich des 60. Breitenkreises häufige Erscheinungen. Jetzt ist es die hinter den Kaltfronten aus Westen einfließende Meeresluft, die sie verursachen. In dieser Jahreszeit übertreffen die Zyklonen mit Höhentieft zum ersten Mal bei den bisher besprochenen Bahngruppen die restlichen Typen an Häufigkeit. - Während der tiefste Kerndruck der hochreichenden Zyklonen im August noch um 990 mb liegt, können sich Mitte September einzelne Zyklonen über dem Ostseewasser schon auf 975 mb vertiefen. Sie deuten damit auf eine Entwicklung im Herbst hin, in dem das durchschnittliche Druckminimum um 5 mb tiefer liegt als im Sommer. Abgesehen von einer Tiefbildung über dem Bottenkvarn, die mit 970 mb den tiefsten Druck erreicht, verlaufen die Zugbahnen im Herbst ausschließlich südlich des 60. Breitenkreises (Vgl. Abb. 48, S. 105). Da die Hauptzugbahnen der hochreichenden Tiefdruckgebiete in dieser Jahreszeit zwischen Island und Norwegen hindurch nach Nordosten führt, überwiegen jetzt im Ostseeraum wieder die flachen Randstörungen, wobei die okkludierten Zyklonen den größten Anteil innehaben. Durch die Niederschläge der maritimen Polarluft, die von ihnen ins Ostseegebiet gebracht wird, breitet sich ab November wieder eine geschlossene Schneedecke über Skandinavien aus. - Im Winter nimmt die zyklonale Aktivität wieder zu und erreicht die Häufigkeit des Frühjahres. Obwohl die Bahnen breiter gestreut sind als im Herbst, ist eine kleine Konzentration entlang der südlichen Ostseeküste festzustellen (Vgl. Abb. 48, S. 105), wo die Zyklonen durch den Temperaturgegensatz Land-See und die unterschiedliche Bodenreibung begünstigt werden. Wird von den sich auf dieser Bahn bewegendes Tiefs die über Schweden lagernde Massengrenze zwischen arktischer Kontinental- und maritimer Polarluft

in ihrem Strömungsbereich mit einbezogen, kommt es bei der einsetzenden Nordströmung zu einem empfindlichen Temperaturrückgang in Südschweden und Ostdeutschland. Den gleichen Effekt verursachen die Deszendierenden Zyklonen, die sich über dem südlichen Ostseeraum bilden, wenn sich der Höhendruckfall eines aus Nordwesten kommenden troposphärischen Kältegebietes bis zum Boden durchsetzt. Die von ihnen einbezogene arktische Kaltluft ist allerdings infolge des längeren Weges über die Nordsee stärker labilisiert, so daß sie neben einem stärkeren Temperaturrückgang auch zu böigen Winden und Schneeschauern von Dänemark bis Hinterpommern führt.

g. Bahngruppe VII

Vergleicht man die Jahresgänge der Bahngruppen VII bis X, die die Herkunftsrichtungen West bis Nord umfassen, dann stellt man fest, daß die Minima alle in die Sommermonate fallen. Dabei liegt das Minimum bei BG VII im Juli, verbreitert sich bei VIII und IX zu Juli und August und umfaßt bei der reinen Nordrichtung X die Monate Juli, August und September. Die Kurven dieser Jahresgänge verlaufen also spiegelbildlich zu denen der in etwa gegenüberliegenden Bahngruppen I bis IV.

Die Bahngruppe VII ist mit 99,9 % Wahrscheinlichkeit überzufällig anders zusammengesetzt als die Bahngruppe VI. Dabei sind es besonders die vermehrt auftretenden Warmsektorzyklonen, die den hohen χ^2 -Wert von 44,4 bedingen.

Tab-elle 14 Bahngruppe VII

Tiefdrucktypen	Frühling	Sommer	Herbst	Winter	Jahr	%
Kaltfrontwelle	3	1	2	-	6	4,0
Kaltfronttief	2	4	1	5	12	8,0
Staffeltief	4	1	2	1	8	6,0
Warmsektorzyklone	8	3	7	7	25	16,0
Okklusionstief	14	11	10	26	61	39,5
Warmfrontwelle	-	-	1	-	1	0,5
Zentralzyklone	7	5	5	3	20	13,0
Kaltes Tief	1	4	-	-	5	3,0
Deszend. Zykl.	2	1	1	-	4	2,5
Aszend. Zykl.	2	1	3	3	9	6,0
Thermisches Tief	-	2	1	1	4	2,5
Summe	43	33	33	46	155	

Bei einem Blick auf die Bahnverteilungen kann man feststellen, daß der Block des südnorwegischen Gebirges einen gewissen Einfluß auf die Zyklonen der Bahngruppe VII ausübt. Obwohl die höchsten Teile des Gebirges nur knapp die Höhe von 2500 m erreichen, scheint von ihnen eine gewisse hemmende Wirkung auf die Zugbahnen der Tiefs auszugehen, denn im Lee des Gebirges ist ein zyklonenfreier Streifen zu erkennen, der sich je nach Jahreszeit zwischen dem 60. und 62. Breitenkreis bewegt (Vgl. Abb. 49/50, S. 111 und Abb. 51/52, S. 113). Auffällig ist, daß sich gerade über dem südnorwegischen Bergland auch die Positionen von Hochdruckgebieten häufen (Vgl. S. EVJEN, 1954), so daß sie vielleicht den Einfluß des Gebirges noch verstärken. Durch diesen zyklonenfreien Streifen wird die Bahngruppe VII in einen nördlichen und einen südlichen Bahnstreifen geteilt, und da die Anzahl der Tiefs auf beiden Streifen genügend groß ist, wurde mit Hilfe des Chi-Quadrat-Testes ermittelt, ob sich die Typenverteilung zwischen beiden markant unterscheidet. Legt man die Verteilung des häufiger begangenen südlichen Bahnstreifens als erwartet zu Grunde und bildet die Klassen a) Kaltfrontwelle, b) Okklusionstief, c) Deszendierende Zyklone und d) Rest, weil die Abweichungen bei ihnen am stärksten sind, dann erhält man den Wert 6,19. Bei drei Freiheitsgraden sagt er aus, daß die Wahrscheinlichkeit der Verschiedenartigkeit beider Bahnstreifen zwischen 75 und 90 % liegt. Dieser Prozentsatz ist aber nicht ausreichend, um von einer eindeutigen Signifikanz zu sprechen. Man darf also annehmen, daß sich die Tiefdrucktypen auf beiden Bahnstreifen annähernd gleich verteilen. Die zyklonalen Einflüsse für das Ostseegebiet sind allerdings unterschiedlich, so daß beide Bahnstreifen bei der jahreszeitlichen Beschreibung getrennt behandelt werden müssen.

Der südliche Bahnstreifen wird hauptsächlich begangen bei einer leicht zyklonal gekrümmten westlichen Höhenströmung über Skandinavien, bei der das steuernde Tief über dem Eismeer nach Osten zieht. Er ähnelt damit stark der Bahngruppe VI, die in etwa von der gleichen Steuerung abhängig ist. Der nördliche Bahnstreifen wird dagegen vornehmlich in Verbindung mit einer leicht antizyklonal gekrümmten Höhenströmung frequentiert, die sich über Lappland einstellt, wenn der hohe Druck über Mitteleuropa einen Hochkeil nach Mittelschweden schiebt oder wenn ein westeuropäisches Hoch sich nach Osten verlagert. Die Tiefdruckgebiete ziehen dann an der Nordabdachung des hohen Drucks in einer flachen Kurve

Abb. 49 Bahngruppe VII

Frühling

- Kaltfrontwelle
- Kaltfronttief
- Staffeltief
- Warmsektorzyklone
- Okklusionstief
- ▽ Zentralzyklone
- ▶ Kaltes Tief
- Deszend. Zykl.
- Aszend. Zykl.

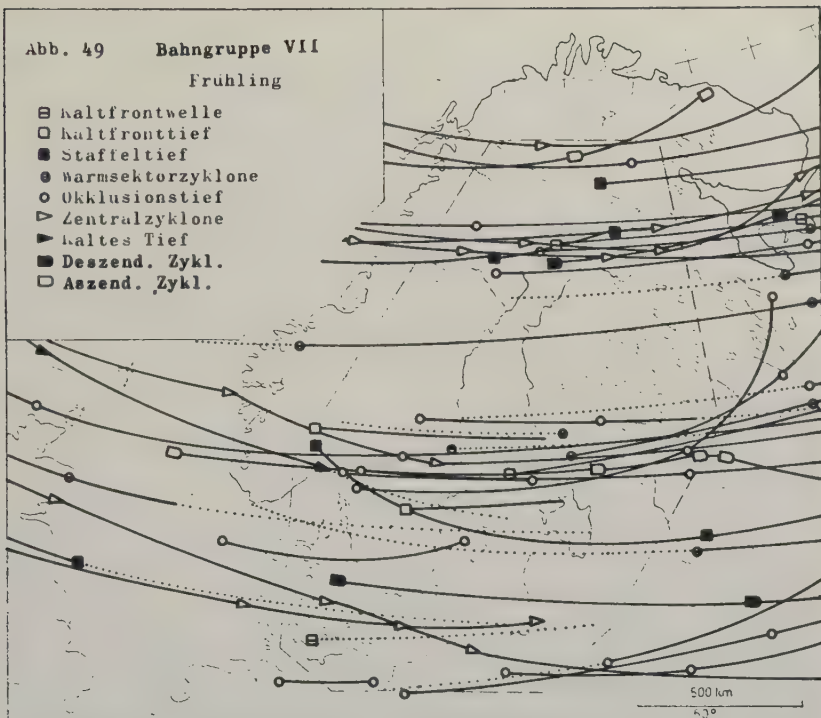
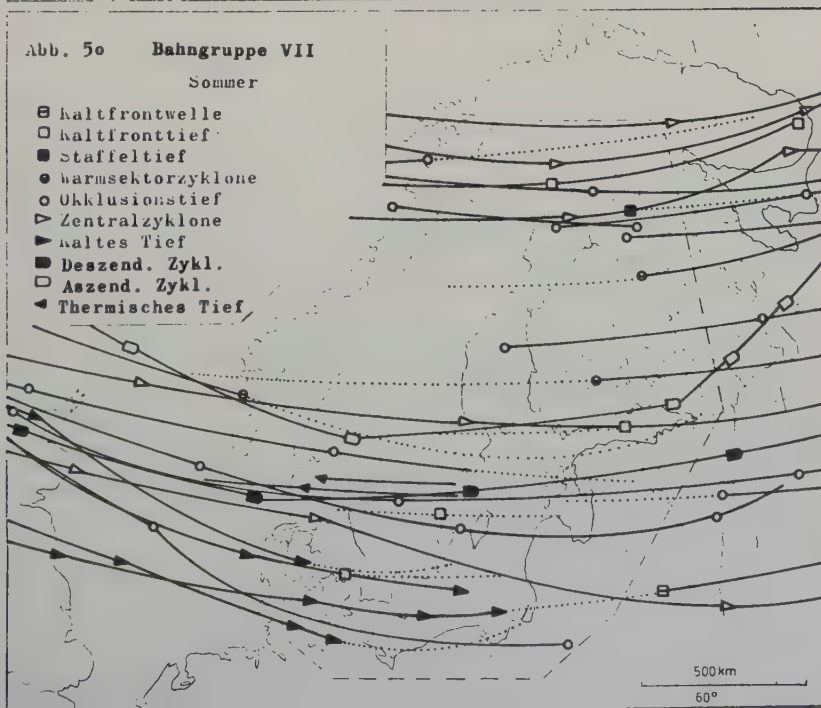


Abb. 50 Bahngruppe VII

Sommer

- Kaltfrontwelle
- Kaltfronttief
- Staffeltief
- Warmsektorzyklone
- Okklusionstief
- ▽ Zentralzyklone
- ▶ Kaltes Tief
- Deszend. Zykl.
- Aszend. Zykl.
- ▲ Thermisches Tief



von Island über Lappland nach Nordrußland. Da nur ein kleiner Teil des antizyklonal gekrümmten Bogens in den Ostseeraum fällt, konnten diese Zugbahnen zur Bahngruppe VII gerechnet werden, da sie sich über Lappland als reine Westbahnen darstellen.

Dem nördlichen Bahnstreifen kommt eine besondere Bedeutung dadurch zu, daß er in der Nähe der "Arktikfront" liegt. Dieser Begriff, der heutzutage von den Meteorologen durch die steuernde hochtroposphärische Strahlstromzone neuerer Fassung ersetzt worden ist (Vgl. J. BLÜTHGEN 1966, S. 336), bezeichnet seit T. BERGERON in meteorologischer Verallgemeinerung die Übergangszone zwischen arktischen und polaren Luftmassen, die im Sommer über Nordskandinavien und im Winter weiter im Norden verläuft. An dieser Grenzlinie zwischen zwei verschiedenen Luftmassen erreicht die Geschwindigkeit der Zyklonen mit 2,12 den höchsten Wert überhaupt, während der GK des südlichen Bahnstreifens nur 2,03 beträgt. Die Abbildungen 49 - 52 dürfen allerdings nicht dazu verleiten, den nördlichen Bahnstreifen als eine gesonderte und selbständige Erscheinung zu sehen. Es handelt sich vielmehr nur um den südlichsten Teil einer nach Norden noch zunehmenden Zyklonenstraße (Vgl. hierzu in der v. BEBBERSchen Bahnkarte seine Bahn I), von der nur die Tiefdruckgebiete erfaßt sind, die mit ihrem Kern das Untersuchungsgebiet wenigstens noch berühren.

Infolge der nördlichen Lage besteht die Luftmasse des Warmsektors, falls sich überhaupt einer ausbildet, im allgemeinen aus maritimer Polarluft, während die Luftmasse hinter der Kaltfront immer arktischen Ursprungs ist. Diese Rückseitenkaltluft ist es, die im Frühjahr zu den NW-Kaltlufteinbrüchen führt, wie sie unter anderem von J. BLÜTHGEN (1940) beschrieben worden sind. Während die flachen Tiefdruckgebiete in dieser Jahreszeit hauptsächlich im Gebiet nördlich des 60. Breitenkreises einen Temperatursturz verursachen, erstreckt sich der Einfluß der hochreichenden Tiefs bis nach Mitteleuropa. Auf ihrer Rückseite wird die Arktikluft auf kürzestem Wege herumgeholt, so daß der Kaltluftvorstoß über Mittelskandinavien und das Baltikum bis weit nach Mittelrußland hinein erfolgt (Vgl. dazu auch Abb. 12, S. 36). - Bei der Rückseitenkaltluft der Zyklonen des südlichen Bahnstreifens, die das Gebiet südlich des 60. Breitenkreises beeinflussen, handelt es sich überwiegend um polare Maritimluft, die in Bodennähe einen wesentlich geringeren Temperaturrückgang bedingt. Trifft sie im Spätfrühling über dem südöstlichen Untersuchungsraum auf die schon

Abb. 51 Bahngruppe VII

Herbst

- Kaltfrontwelle
- Kaltfronttief
- Staffeltief
- Warmsektorzyklone
- △ Okklusionstief
- ▽ Warmfrontwelle
- ▲ Zentralzyklone
- Deszend. Zykl.
- Aszend. Zykl.
- ▲ Thermisches Tief

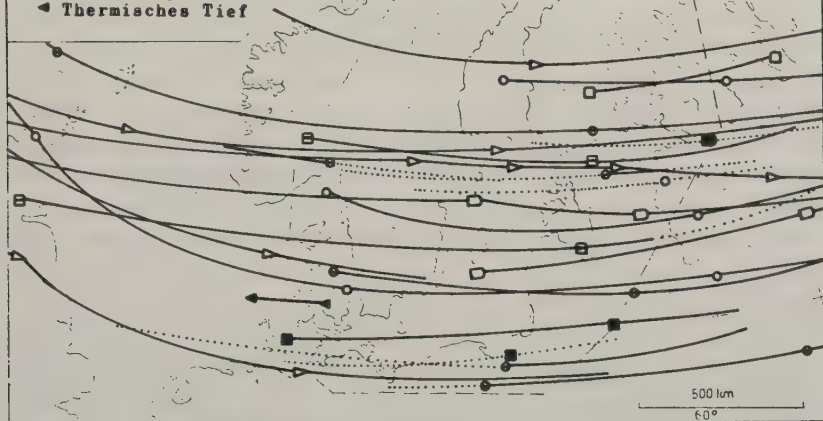
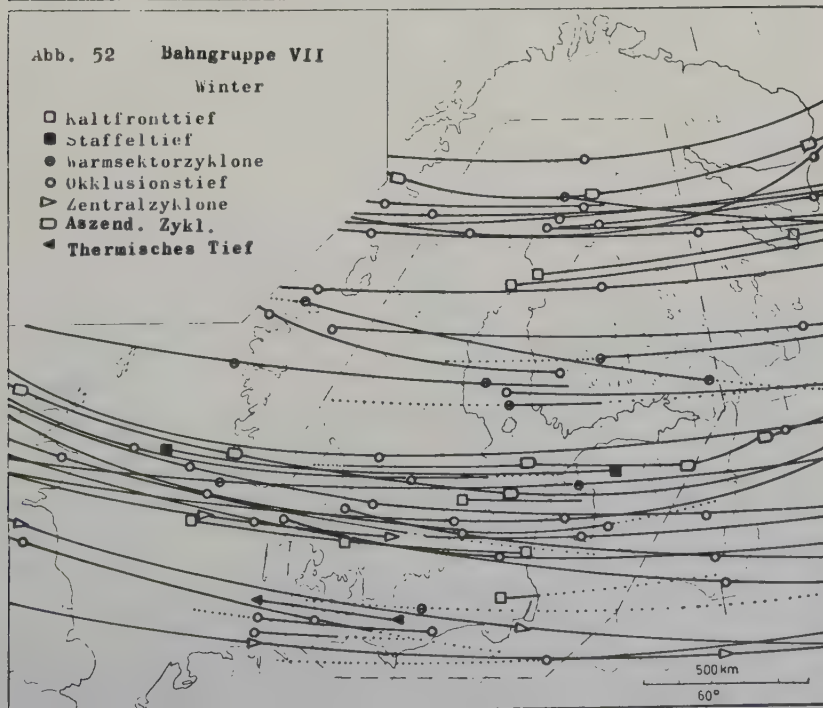


Abb. 52 Bahngruppe VII

Winter

- Kaltfronttief
- Staffeltief
- Warmsektorzyklone
- Okklusionstief
- △ Zentralzyklone
- Aszend. Zykl.
- ▲ Thermisches Tief



stark erhitzte Festlandsluft, dann kommt es über Polen und dem Baltikum zu heftigen Gewitterschauern.

Auch im Sommer ist der Einbruch der polaren Meeresluft mit Schauern und Gewittern verbunden, aber während im Frühling der zyklogenetische Einfluß des südnorwegischen Gebirges stärker hervortritt, verlagert sich jetzt der Schwerpunkt der Bahnen mehr in die Nordsee, so daß der Einfluß der Tiefs nicht so weit nach Osten reicht wie im Frühling (Vgl. Abb. 49/50, S. 111). Für Dänemark und die deutsche Ostseeküste sind im Sommer die hochreichenden Kalten Tiefs von Bedeutung, die über der südlichen Ostsee absterben und auf engem Raum hohe Niederschlagssummen bringen können. - Bahngruppe VII erreicht im Juli ihr Monatsminimum (Vgl. Diagr. 19); In diesem Monat wird der südliche Bahnstreifen fast gar nicht begangen, während der nördliche sein Begehungsmaximum aufweist. Hinter den okkludierten Zyklonen dieses Bahnstreifens fließt zwar auch arktische Luft mit nordwestlichen Strömungen über Lappland

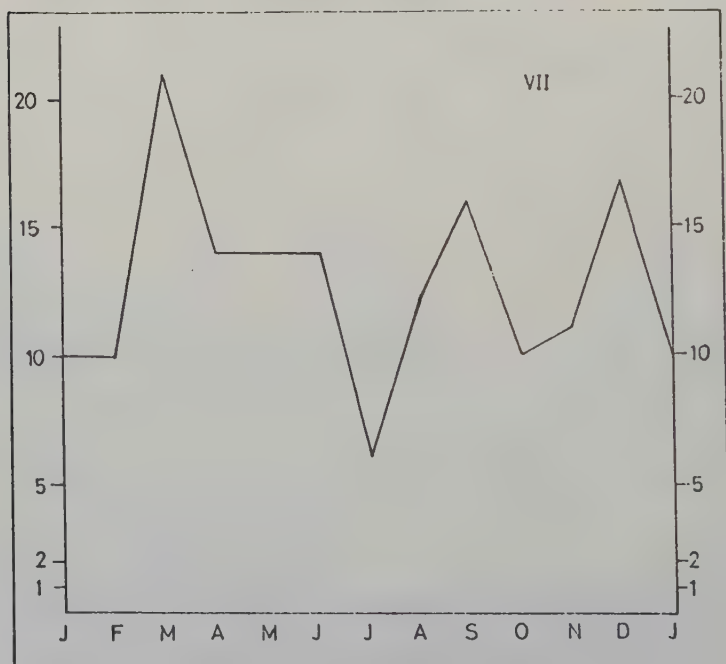


Diagramm 19 Jahresgang der Bahngruppe VII

ein, aber infolge der geringen Temperaturunterschiede führt sie nicht zur Bildung von sekundären Kaltluftstaffeln wie im Frühjahr. Erst im Herbst, wenn die polare Kaltluftproduktion rasch zunimmt, erfolgen wieder kräftige Ausbrüche hochreichender Polarluft aus Nordwest (Vgl. Abb. 51, S. 113). Von der Unterlage erwärmt, erreicht die Kaltluft die norwegische Küste mit positiven Temperaturen und wird zum Überqueren des Gebirges gezwungen, wobei es zu Niederschlägen kommt. Unmittelbar östlich davon am Gebirgsfuß muß sie jedoch absteigen. Dies führt zu starker Aufheiterung, die sogar noch jenseits des Bottnischen Meerbusens spürbar ist. In dieser dynamisch erzwungenen Aufheiterungszone bedingt die Ausstrahlung im November in diesen Breiten innerhalb eines polaren Luftpörpers Frost. Der theoretisch zu erwartende föhnartige Erwärmungseffekt wird von dem abkühlenden Strahlungseffekt überlagert. Machte sich die Überquerung des Bottenbusens im Wolkenfeld nicht bemerkbar, so bereits klar im Temperaturfeld. Der Bottenbusen bewirkt entlang seiner Küsten, vornehmlich der luvseitigen, eine Temperaturerhöhung." "Nach dem Binnenlande zu sinkt dann die Temperatur wieder" (J. BLÜTHGEN, 1940, S. 135 f). Die gleiche Erscheinung einer Temperaturzunahme vom Ostfuß des Gebirges zur Ostsee hin tritt ein, wenn ein Kaltluftblock im Schutze des Gebirges lagert, der von der Meeresluft nicht weggeräumt, sondern nur überweht wird, so daß es zu Mischungs- und Aufgleitniederschlägen kommt. Erst über der Ostsee setzt sich dann der erwärmende Einfluß der Maritimluft bis zum Boden durch,

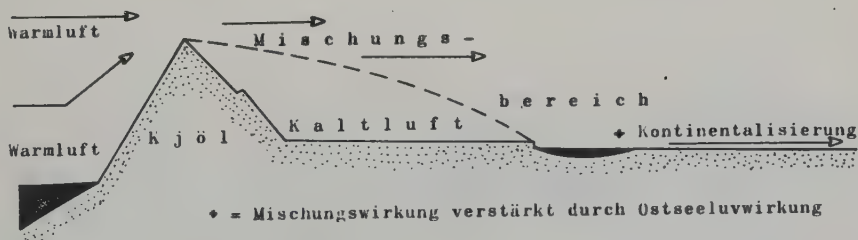


Abb. 53 Querschnitt durch Nordeuropa von W nach O bei Westwindüberwehung.

so daß die östliche Küste durch den summierten Einfluß von absteigender milder Meeresluft und warmem Ostseewasser eine Temperaturerhöhung erfährt (Vgl. Abb. 53, S. 115).

Die Zyklonen des südlichen Bahnstreifens weisen nicht diese Wirkung auf; der erwärmende Einfluß der Meeresluft nimmt kontinuierlich ab, je weiter die Luftmasse nach Osten vordringt. Da die Westwinde durch keinen Gebirgswall gebremst werden, kommt es über der südlichen Ostsee bei starkem Druckgradienten zu den gefürchteten Herbststürmen, die an den betroffenen Küstenteilen große Zerstörungen verursachen können (Vgl. E.NEHL, 1933).

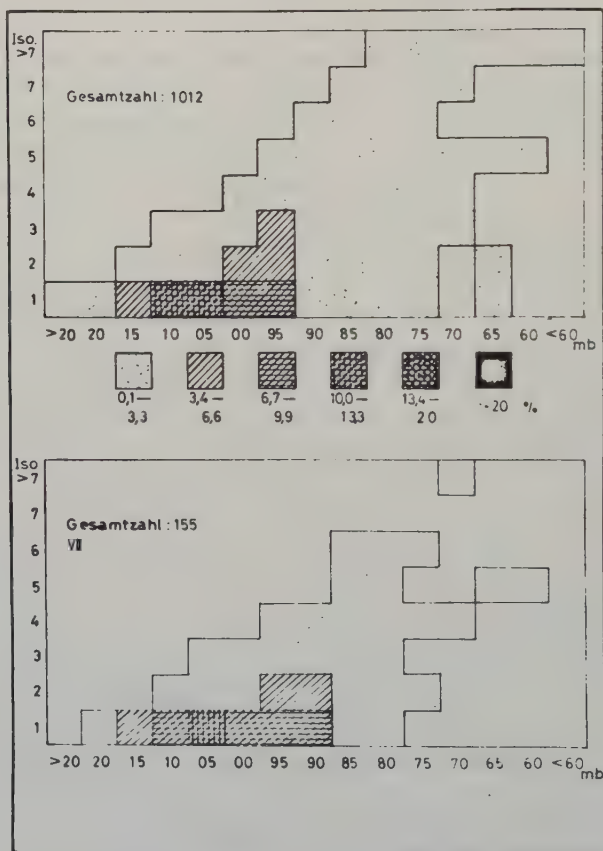


Diagramm 20 Verteilung der Intensitätsfaktoren

In der Verteilung der Intensitätsfaktoren ist es neben dem Winter besonders der Herbst und hier wiederum der südliche Bahnstreifen, der für die hohen Werte verantwortlich ist, während die niedrigen Werte von 10/1 bis 95/2, zwischen denen auch der Schwerpunkt liegt, vornehmlich auf den Sommer zurückgehen (Vgl. Diagr. 20, S. 116).

Während der Herbst mit 33 Fällen ebenso wie der Sommer ein Jahreszeitenminimum aufweist, erreicht die Häufigkeit im Winter ihren höchsten Stand (Vgl. Abb. 52, S. 113). Die Typenverteilung hat sich sehr eindeutig auf die okkludierten Zyklonen verlagert, deren Anteil jetzt über 50 % ausmacht. Es handelt sich dabei meist um Randstörungen von Nordmeerzyklonen, die sich am Okklusionspunkt gebildet haben und die selbständig nach Osten ziehen. Durch ihre milde Meeresluft wird der Südteil des Ostseeraumes mit geschlossener Bewölkung und Aufgleitniederschlägen überzogen. Nur die in geringer Zahl auftretenden hochreichenden Zyklonen sind kräftig genug, auf ihrer Rückseite einen Kaltluftstrom aus Nordost in Bewegung zu setzen. Über Finnland erfolgt dann in der trockenen Kontinentalluft ein starkes Absinken der Temperaturen, während die Luftmasse an der deutschen Ostseeküste, durch den Weg über die Ostsee erwärmt, neben einer nur mäßigen Temperaturerniedrigung heftige Schneeschauer verursacht. - Auch die Zyklonen des nördlichen Bahnstreifens verursachen nur ganz selten Kaltluftausbrüche nach Süden. Ihre aus Westen kommende maritime Polarluft führt vielmehr über Nord- und Mittelfinnland zu verbreiteten Schneefällen.

h. Bahngruppe VIII

Im Verhältnis zur letzten Bahngruppe hat bei VIII der Anteil der Staffeltiefs und besonders der der Deszendierenden Zyklonen, die ja beide mit dem Ausbruch nördlicher Polarluft zusammenhängen, zugenommen, während die Zahl der Warmsektorzyklonen etwas zurückgegangen ist (Vgl. Tabelle 15, S. 118). Bei ihnen handelt es sich hauptsächlich um ehemalige Warmfrontwellen, die sich durch das Vordringen nördlicher Kaltluft auf ihrer Rückseite über dem Nordmeer vom Muttertief getrennt haben. Trotz dieser Unterschiede ist die Abweichung in der Typenverteilung nicht signifikant, so daß die Trennung der beiden Bahngruppen allein in der differierenden Bewegungsrichtung der Zyklonen liegt.

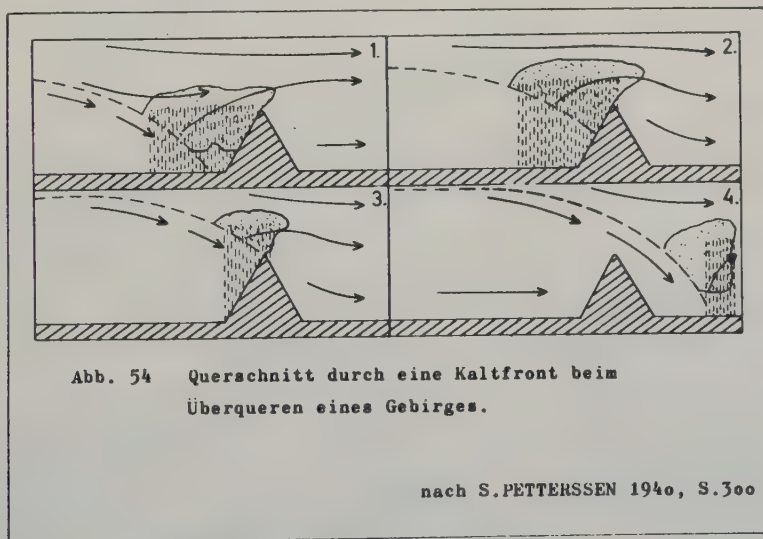
Für die Zugrichtung der Zyklonen ist ein Hoch über den britischen Inseln maßgeblich. Durch die blockierende Wirkung des hohen Drucks wird die Höhenströmung gezwungen, in einem weiten Bogen nach Nordosten auszuweichen. Nachdem sie über dem Nordmeer ihren Scheitelpunkt erreicht hat, verläuft sie über dem Ostseeraum in nordwest-südöstlicher Richtung. Durch den Hochkeil oder das Hoch wird Tropikluft aus dem Atlantik weit nach Norden gegen die Polarluft verfrachtet, so daß durch das dadurch verursachte starke Temperatur- und Dichtegefälle die Frontalzone intensiviert wird, so daß auch die von ihr gesteuerten Zyklonen mit einem GK von 2,09 eine sehr große Geschwindigkeit aufweisen.

Tabèlle 15 Bahngruppe VIII

Tiefdrucktypen	Frühling	Sommer	Herbst	Winter	Jahr	%
Kaltfrontwelle	2	-	2	2	6	4,0
Kaltfronttief	3	2	3	3	11	7,0
Staffeltief	4	-	2	5	11	7,0
Warmsektorzyklone	3	4	11	5	23	14,5
Okklusionstief	22	8	19	15	64	39,0
Zentralzyklone	2	2	10	3	17	10,5
Kaltes Tief	1	2	-	1	4	2,5
Azsend. Zykl.	3	3	2	4	12	7,5
Deszend. Zykl.	2	9	-	-	11	7,0
Thermisches Tief	-	-	1	4	5	3,5
Summe	42	30	50	42	164	

Im Gegensatz zur Bahngruppe VII läßt sich hier kein so ausgeprägter Einfluß des südnorwegischen Berglandes nachweisen. Am ehesten ist noch eine gewisse Wirkung im Frühling zu erkennen, wo sich ein zyklonenfreier Streifen von Oslo bis zur Insel Gotland erstreckt (Vgl. Abb. 55, S. 120); im Übrigen sind die Zugbahnen über das ganze Gebiet gestreut. - Auch bei den Tiefs der Bahngruppe VIII stößt im Frühling nach Durchzug der Kaltfront, hinter der die Maritimluft noch bis zur Mitte der Jahreszeit den östlichen Teilen des Untersuchungsraumes Niederschläge und Erwärmung bringt, arktische Kaltluft auf der Rückseite vor, so daß es während des Durchzuges zu einer Vertiefung der Zyklonen um Beträge bis zu 30 mb kommen kann. Je nach Lage der Zugbahn reicht die Auswirkung des Kälteeinbruches von Südfinnland bis nach Mitteleuropa.

Wenn sich im späten Frühling die Temperaturverhältnisse zwischen Land und Meer umkehren, bringen die Kaltfronten der zahlreichen Okklusionstiefs jetzt kühle Meeresluft in das Ostseeggebiet. In Ergänzung zu Abbildung 53, S. 115, sollen auch die Verhältnisse des Frühlings dargestellt werden, die sich ergeben, wenn eine Kaltfront das Gebirge passiert. (Die in den Abbildungen 53, 54, 57 und 60 dargestellten Verhältnisse gelten natürlich nicht nur für die Bahngruppe VIII, sondern in gleicher Weise für die Frontendurchgänge anderer Bahngruppen. Sie werden nur deshalb hier dargestellt, weil das norwegische Gebirge zur Richtung der Bahngruppe VIII einen rechten Winkel bildet, so daß die Vorgänge bei weitestgehender Parallelität von Gebirgszug und Front am unkompliziertesten sind.)



Wie die Abbildung 54 zeigt, wird der Kaltluftkeil bei Annäherung an das Gebirge zurückgehalten, während die Kaltfront am Abhang des Gebirges hinaufsteigt, wobei die Wolken durch die Hebungsvorgänge den größten Teil ihres Wassergehaltes verlieren. Liegt hinter dem Gebirgswall jetzt nicht wie im Winter ein Kaltluftblock, sondern Warmluft, dann wird diese von der das Gebirge überfließenden Kaltluft weggeräumt. Durch den dynamisch bedingten Abstieg der Luft lösen sich über Schweden die Wolken auf, so daß es in einem breiten Streifen in Lee des Gebirges zu niederschlagsfreiem, sonnigem Wetter kommt.

Abb. 55 Bahngruppe VIII

Frühling

- kaltfrontwelle
- kaltfronttief
- Staffeltief
- Warmsektorzyklone
- Okklusionstief
- ▽ Zentralzyklone
- ▼ kaltes Tief
- Deszend. Zykl.
- Aszend. Zykl.

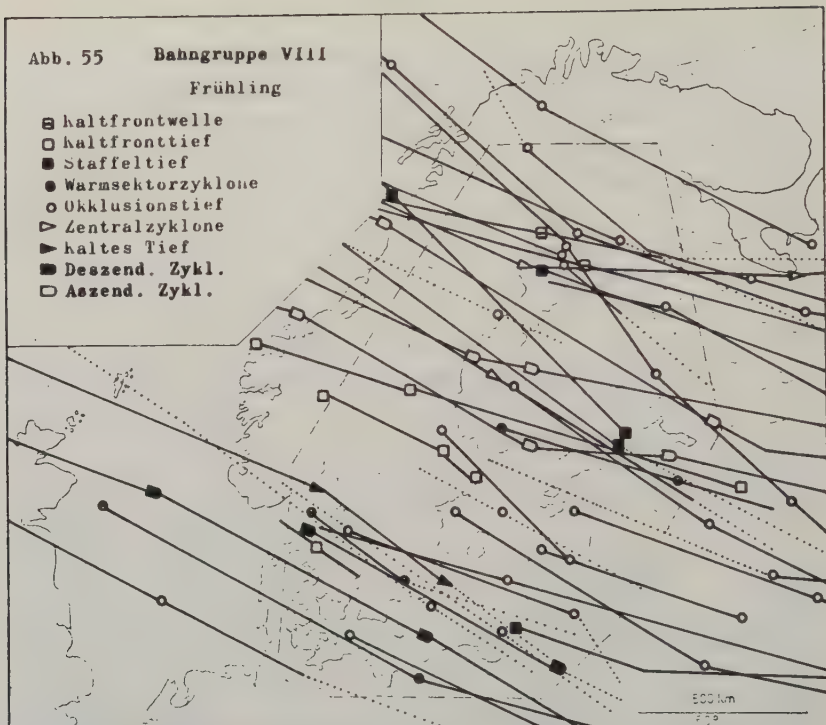
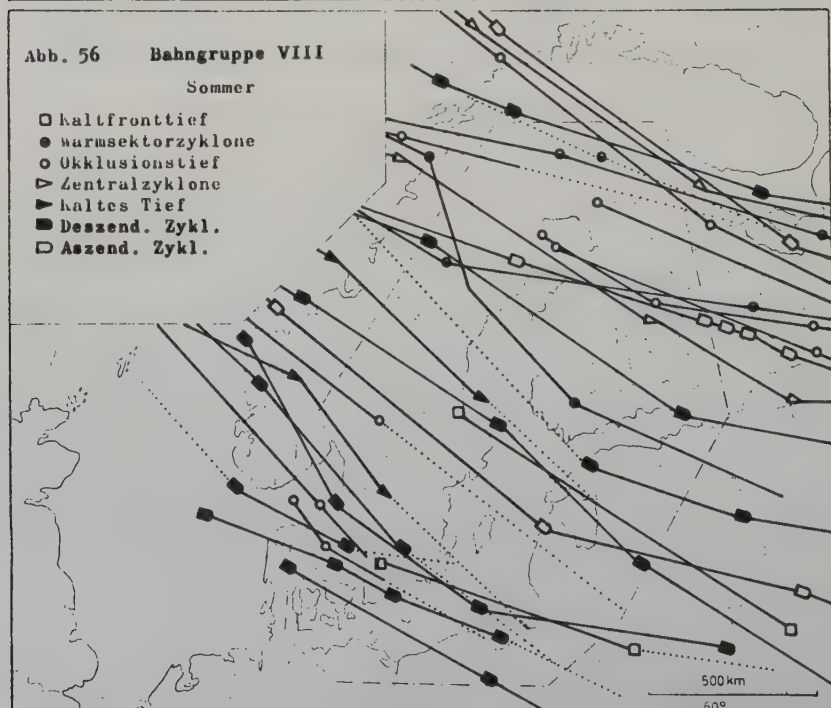


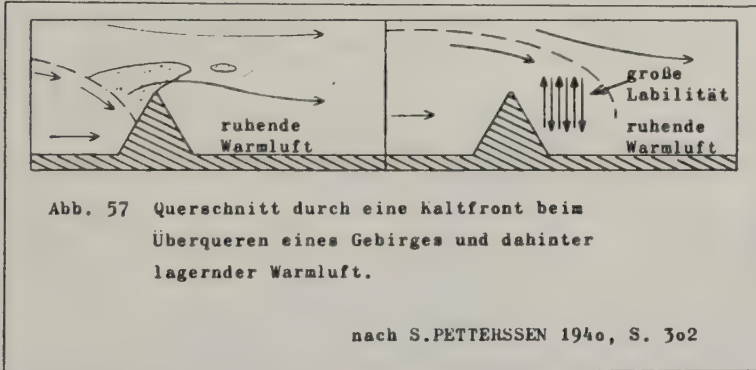
Abb. 56 Bahngruppe VIII

Sommer

- kaltfronttief
- warmsektorzyklone
- Okklusionstief
- ▽ Zentralzyklone
- ▼ kaltes Tief
- Deszend. Zykl.
- Aszend. Zykl.



Ähnlich ist die Situation im Sommer (Vgl. Abb. 57); nur ist die Warmluft auf der Ostseite des Gebirges durch die verstärkte Insolation sehr viel wärmer, so daß es durch die in der Höhe einfließende Kaltluft zu turbulenten Umlagerungen mit Schauerniederschlägen und Gewittern kommt.



Auffallend bei der Zusammensetzung der Bahngruppe VIII im Sommer ist der hohe Anteil an Deszendierenden Zyklonen, die hier mit 9 Fällen die größte absolute Häufigkeit von allen Bahngruppen und Jahreszeiten erreichen (Vgl. Abb. 56, S. 120). Da ihre Entstehung definitionsgemäß mit dem Ausbruch hochreichender Polarluft zusammenhängt, mag ihr Auftreten im Sommer vielleicht verwunderlich erscheinen. Die Zusammenhänge werden aber dann deutlich, wenn man bedenkt, daß im Sommer die Azorenhochvorstöße am stärksten entwickelt sind und daher am weitesten nach Norden reichen (Vgl. H.REINEL, 1960). Durch die Gradientenschärfung, die auf der Nordostseite der Hochkeile eintritt - die Windgeschwindigkeiten in der Frontalzone können selbst im August winterliche Werte annehmen - wird Kaltluft in einer mehr oder minder schmalen Zunge nach Südosten in Bewegung gesetzt (Vgl. H.KRUHL, 1950). In ihr schnürt sich zuerst ein Kaltlufttropfen ab, der sich dann, wenn sich der Druckfall bis zum Boden durchsetzt, zu einer Deszendierenden Zyklone wandelt, die sich oft von der Erdoberfläche bis ins 100 mb-Niveau erstreckt. - Die arktische Kaltluft, die auf der Südwestseite dieser Tiefs hinter einer markanten Kaltfront einfließt, führt beim Einbruch in die kontinentale Warmluft zu heftigen Schauern und Gewittern.

Abb. 58 Bahngruppe VIII

Herbst

- kaltfrontwelle
- kaltfronttief
- Staffeltief
- warmsektorzyklone
- Okklusionstief
- ▽ Zentralzyklone
- Ascend. Zykl.
- ▲ Thermisches Tief

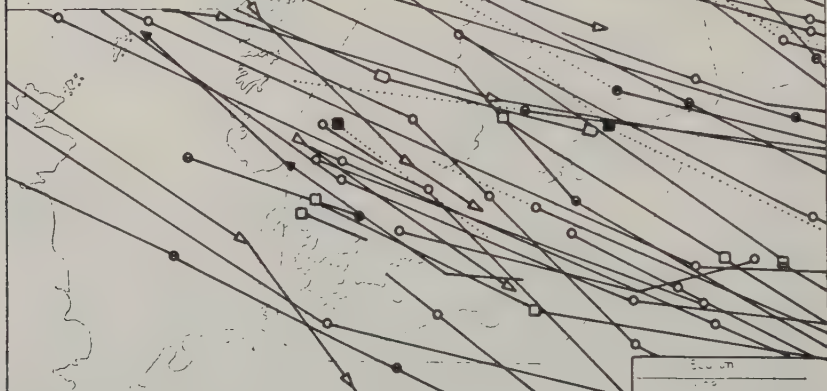
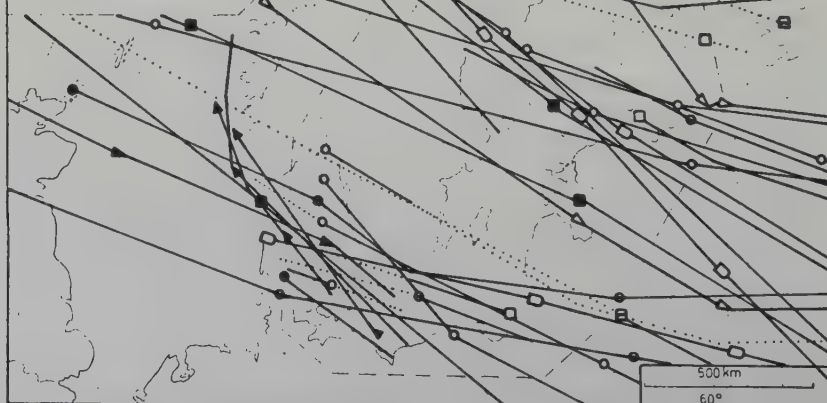


Abb. 59 Bahngruppe VIII

Winter

- kaltfrontwelle
- kaltfronttief
- Staffeltief
- warmsektorzyklone
- Okklusionstief
- ▽ Zentralzyklone
- ▼ kaltes Tief
- Ascend. Zykl.
- ▲ Thermisches Tief



Innerhalb der Bahngruppe VIII ist die Zahl der Tiefs im Herbst am größten (Vgl. Abb. 58, S. 122), wobei das Monatsmaximum in den Oktober fällt (Vgl. Diagr. 21). Im Gegensatz zum

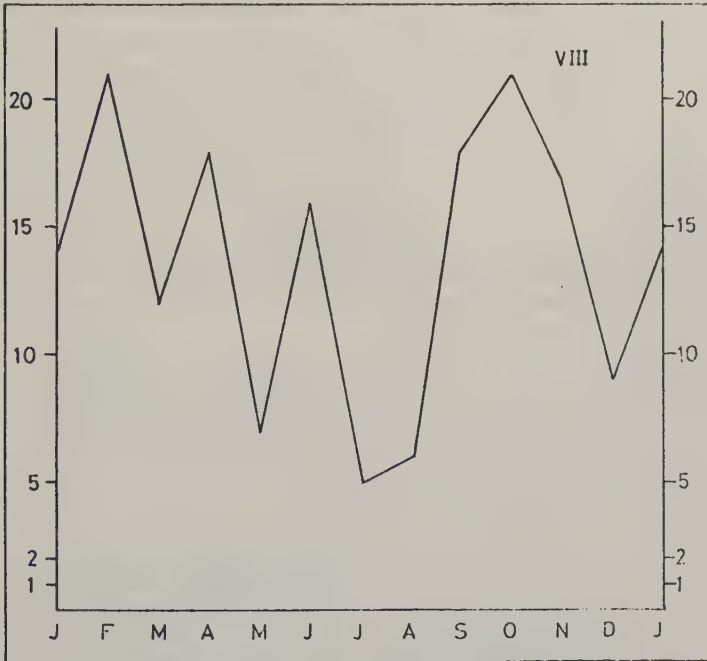
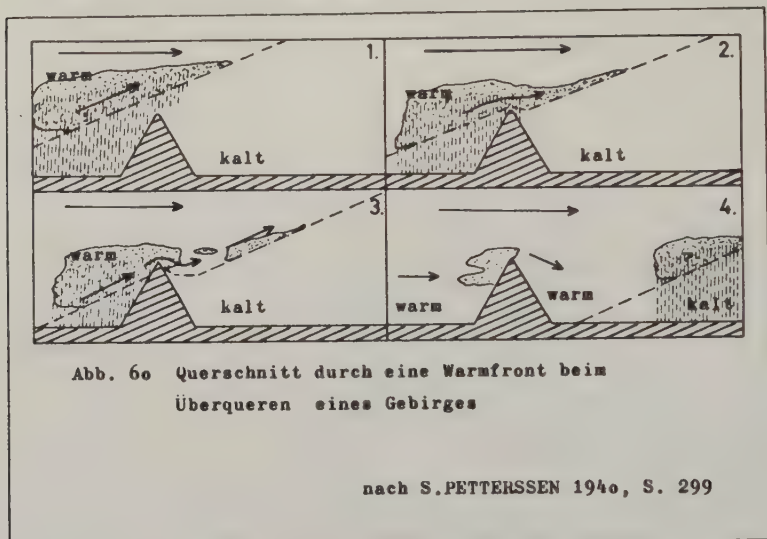


Diagramm 21 Jahresgang der Bahngruppe VIII

Sommer hat sich das Schwergewicht in der Typenverteilung wieder auf die flachen Tiefdruckgebiete verlagert. Bei ihnen treten besonders die Warmsektorzyklonen an Zahn hervor (Vgl. Tabl. 15, S. 118), die gemäßigte maritime Tropikluft, welche auf der Westseite eines britischen Hochs nach Norden geflossen ist, in den Ostseeraum transportieren. Die dabei auftretenden Verhältnisse an der Warmfront beim Überschreiten des Gebirges zeigt Abb. 60 (S. 124), die die Reihe der Frontenüberquerungen von Gebirgen abschließend vervollständigt. Diese Verhältnisse stellen sich im Frühherbst ein, bevor sich im Schutz des Gebirges ein Kaltluftblock bildet. Auch hier ist wieder die föhnige Aufheiterung auf der Ostseite des Gebirges zu erkennen. Im Gegensatz zur Kaltfront setzt sich aber die Warmfront erst in einiger Entfernung von dem Hindernis wieder zum Boden durch, so daß sie direkt im Lee des Gebirges

nur als Höhenwarmfront erscheint.

Im Winter (Vgl. Abb. 59, S. 122) verursachen nur die Zyklonen, die südlich des südnorwegischen Berglandes vorbeiziehen, mit ihrer milden Meeresluft Tauwetter von Norddeutschland bis Polen, während sich auf der Rückseite der weiter nördlich liegenden Zugbahnen fast regelmäßig ein Kaltluftausbruch einstellt. Dabei beginnt die



Kaltluftzufuhr zuerst aus Nordwest, von wo aus die hochreichende Polarluft oft in mehreren Staffeln einbricht. Deshalb erreichen nun auch die Staffeltiefs in dieser Jahreszeit ihr Maximum (Vgl. Tab. 15, S. 118). Während sich die Kaltluft mit starken Winden und Schneefall parallel zur Zyklonenbahn weiter nach Südosten durchsetzt, dreht die Strömung unter Temperaturabnahme immer weiter nach rechts, bis sich schließlich hinter dem abgezogenen Tief über dem mittleren Ostseeraum eine nordöstliche Bodenströmung einstellt, die über Finnland zwar zu wenig Schneefall, dafür aber zu einem empfindlichen Temperaturrückgang führt. Erst wenn die Kaltluft nach Überfließen des relativ warmen Ostseewassers die schwedische Ostküste erreicht, kommt es infolge der unterschiedlichen Bodenreibung zu verstärkten Schneefällen (Vgl. S. 81 ff.). Ist eine Zyklone besonders kräftig entwickelt, so kann es vorkommen, daß auf ihrer Vorderseite Warmluft aus dem südosteuropäischen Raum eingewirbelt wird, die beim Aufgleiten auf die Kalt-

luft über dem Weißen Meer und Nordfinnland zu Schneefällen führt.

Da der Kerndruck der hochreichenden Zyklonen im Februar die geringsten Werte aufweist, kommt es in diesem Monat in der einbrechenden Polarluft zu heftigen Nordweststürmen, die von Schneeschauern begleitet sind. In diesem Zusammenhang muß der Orkanwirbel vom 16./17. Februar 1962 Erwähnung finden, der an der Nordseeküste Deichbrüche mit katastrophalen Folgen, besonders für Hamburg, verursachte (Vgl. BECKER, 1962). Er entstand über der Irmingersee als kleines Teiltief von 995 mb und wurde auf der Nordostseite eines Azorenhochs in den Ostseeraum gesteuert. Durch Einbeziehung frischer Polarluft konnte er sich ständig vertiefen,

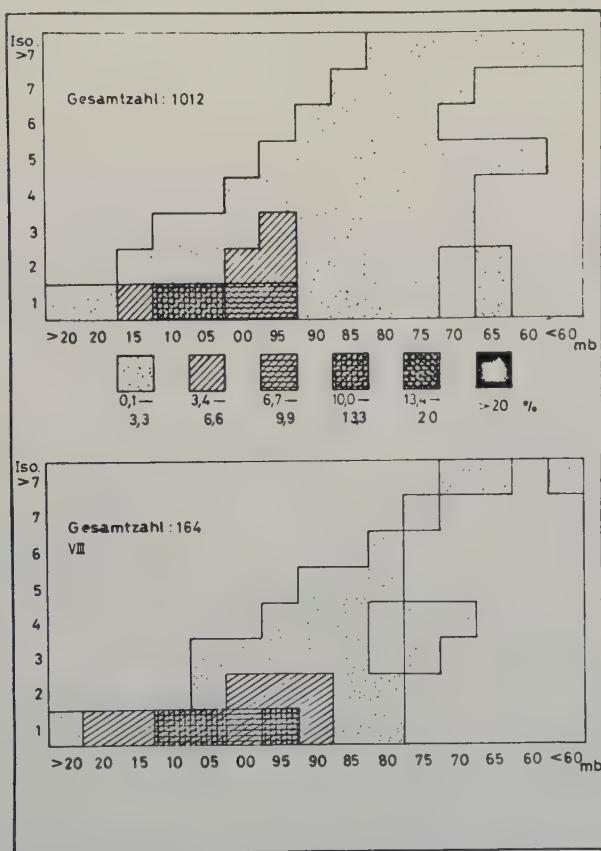


Diagramm 22 Verteilung der Intensitätsfaktoren

so daß er über der Ostsee vor Stockholm mit einem Druck von 995 mb und 7 geschlossenen Isobaren seine größte Intensität erreichte. Während auf der Rückseite der Zyklone Nordwestwind bis Stärke 8 über der südlichen Ostsee gemessen wurde, kam es vor der Okklusion über Finnland bei kaltem Ostwind zu verbreiteten Schneefällen.

Obwohl in der Verteilung der Intensitätsfaktoren die tieferen Werte ($< 90/2$) zahlreich vertreten sind - z.B. kommt fünfmal der Wert $90/4$ und zweimal der Wert $65/8$ vor - liegt der Schwerpunkt auf den Werten zwischen $10/1$ und $95/1$ (Vgl. Diagr. 22, S. 125).

i. Bahngruppe IX

Führt der Vorstoß hohen Drucks über den Ostatlantik und die Britischen Inseln noch weiter nach Norden als bei Bahngruppe VIII, dann weist die Frontalzone einen "low index", d.h. eine starke Meridionalisierung auf. Die Zone der schärfsten Temperatur- und Druckgegensätze verläuft dann zwischen einem Hoch im Westen und einem Tiefdrucktrog im Osten in südöstlicher Richtung über den Ostseeraum hinweg. Der Trog reicht bei dieser Bahngruppe allerdings nicht so weit nach Süden wie bei Bahngruppe X (reine Nordrichtung), so daß die Zugrichtung der Zyklonen in den meisten Fällen schon im südlichen Ostseeraum nach links abbiegt (Vgl. Abb. 61/62, S. 128). - Infolge der kräftig ausgeprägten Frontalzone wandern mehr Tiefdruckgebiete schnell als langsam, so daß der GK mit 2,09 einen überdurchschnittlichen Wert aufweist.

Bahngruppe IX kann als typisch für die kalte Jahreszeit gelten, denn $2/3$ aller Zyklonen treten in den Monaten Oktober bis März auf. Nach einem Minimum im August steigt die Häufigkeit bis Dezember kontinuierlich an und erreicht nach einem kleineren Rückgang im Dezember im Januar und Februar ihr Maximum (Vgl. Diagr. 23, S. 127). Nach einem sekundären Minimum im April steigt die Zahl der Fälle dann im Mai noch einmal an.

Nachdem die Zahl der Kaltfrontwellen schon bei Bahngruppe VIII zurückgegangen ist, ist dieser Typ jetzt gänzlich verschwunden (Vgl. Tabelle 16, S. 127). Damit er überhaupt auftreten könnte, müßte die Kaltfront einer östlichen Zyklone nach einem weiten südlichen Bogen geradewegs nach Nordwesten verlaufen. Falls dieser Fall wirklich einmal eintritt, wird die entstandene Welle sofort instabil durch den Vorstoß wärmerer Luftmassen aus Südwest und

verwirbelt stärker, so daß in dieser Bahngruppe keine Kaltfrontwellen vorkommen. Auch Warmfrontwellen treten nicht mehr auf, da sie durch die Rückseitenkaltluft in kürzester Zeit verwirbeln würden. Dagegen ist die Zahl der Tiefs, die noch einen geöffneten Warmsektor aufweisen, noch recht hoch. Allerdings besteht er auch hier wie schon bei Bahngruppe VIII immer aus maritimer Polarluft. Das Fehlen von flachen Thermischen Tiefs ist wohl nur zufällig, da sie bei VIII und auch bei Bahngruppe X auftreten.



Diagramm 23 Jahresgang der Bahngruppe IX

Tabelle 16 Bahngruppe IX

Tiefdrucktypen	Frühling	Sommer	Herbst	Winter	Jahr	%
Kaltfronttief	1	-	1	1	3	4,5
Staffeltief	2	1	-	-	3	4,5
Warmsektorzyklone	3	-	1	8	12	19,0
Okklusionstief	4	2	11	8	25	39,5
Zentralzyklone	1	-	4	1	6	9,5
Deszend. Zykl.	3	1	2	3	9	14,5
Aszend. Zykl.	2	-	2	1	5	8,0
Summe	14	4	21	22	63	

Für den Vergleich der Typenverteilungen werden sie deshalb auch nicht herangezogen. Dagegen ist die Zunahme der Deszendierenden Zyklonen reell, die hier von allen gestreckten Bahngruppen ihr relatives Maximum aufweisen. Ein Vergleich in den Klassen a) Kaltfrontwelle, b) Deszendierende Zyklone und c) Rest ergibt bei einem χ^2 -Wert von 16,34 bei zwei Freiheitsgraden eine Signifikanz auf dem 0,1-Niveau.

Abb. 61 Bahngruppe IX

— Frühling
- - - Sommer

- Kaltfronttief
- Staffeltief
- Warmsektorzyklone
- Okklusionstief
- ▽ Zentralzyklone
- Deszend. Zykl.
- Aszend. Zykl.

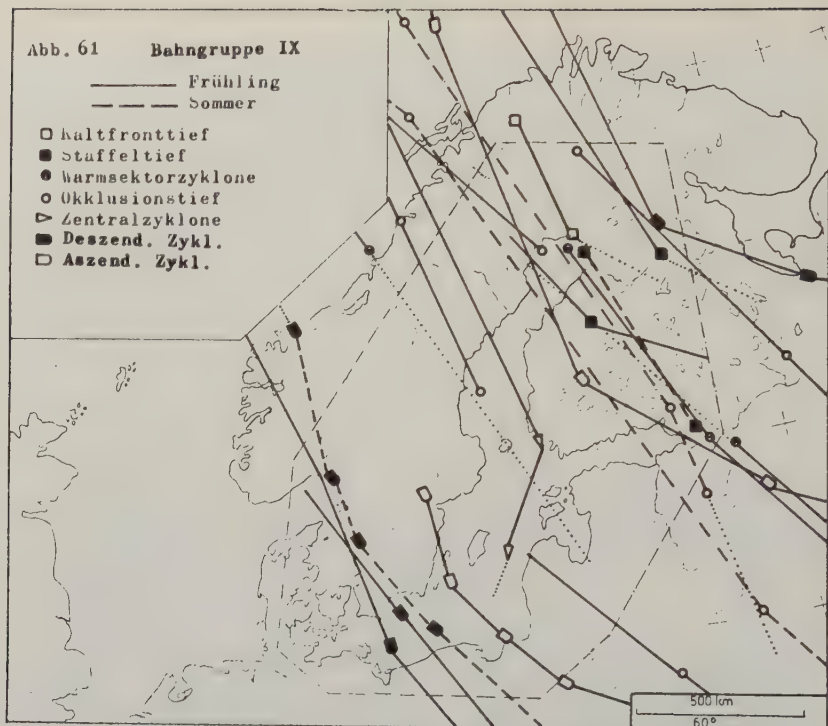
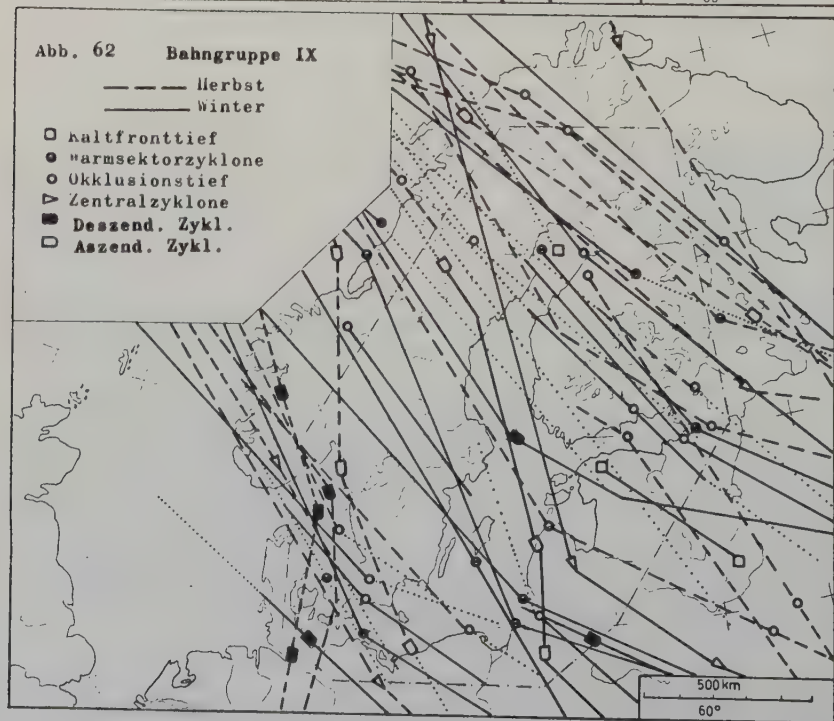


Abb. 62 Bahngruppe IX

- - - Herbst
— Winter

- Kaltfronttief
- Warmsektorzyklone
- Okklusionstief
- ▽ Zentralzyklone
- Deszend. Zykl.
- Aszend. Zykl.



Bei der Bahngruppe IX sind zu allen Jahreszeiten zwei Verdichtungsgebiete zu erkennen, von denen das eine über dem Skagerrak und das andere über dem Bottnischen Meerbusen liegt (Vgl. Abb. 61/62). Der südlichere Bahnstreifen wird häufiger von hochreichenden Zyklen begangen, von denen wiederum die Deszendierenden Zyklen den größten Anteil stellen, die sich in einem mit einem Hochdruckvorstoß korrespondierenden Kaltluftausbruch bilden. Ihr Abkühlungsgebiet, das im Frühjahr und Sommer noch mit Schauern und Gewittern verbunden ist, streift das Ostseegebiet allerdings nur randlich. Die Deszendierende Zyklone über Finnland entstand, als sich am 20. Mai 1959 an der Ostflanke einer meridionalen Hochdruckbrücke, die sich von der Grönlandsee zum

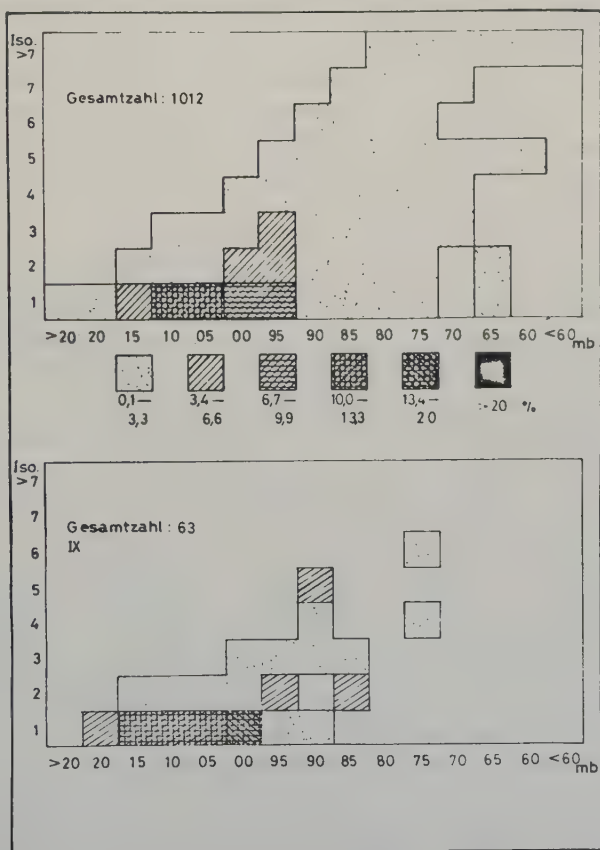


Diagramm 24 Verteilung der Intensitätsfaktoren

Nordmeer erstreckte, der Kältepol der Nordhemisphäre von Spitzbergen nach Nordnorwegen verlagerte. Über Tromsø ging dadurch die Temperatur im 500 mb-Niveau von -33° auf -40° zurück. Hinter der Kaltfront des zugehörigen Bodentiefs über Nordfinnland sanken die Bodentemperaturen in Lappland bei Nordwestwind advektiv auf -5° ab. Auch die übrigen Tiefs dieses Bahnstreifens verursachen im Frühling und Sommer mit ihrer arktischen Polarluft aus Nordwest eine stärkere Abkühlung, die sich bis zum Baltikum bemerkbar macht.

Im Herbst und Winter nimmt die Frequenz stark zu und die Zugbahnen verteilen sich dabei über das ganze Gebiet, aber zumindest im Herbst sind die beiden Verdichtungsgebiete noch gut zu erkennen. Untersucht man nur die Tiefdruckgebiete, die sich nordöstlich der Linie Trondheim-Danzig bewegen, so muß man feststellen, daß sich 40 % der Fälle über dem Ostseeraum noch vertiefen. Als Resultat zeigt sich bei den Intensitätsfaktoren eine überdurchschnittliche Besetzung der Werte 90/5 und 85/2, auf die 3 bzw. 4 Tiefs entfallen (Vgl. Diag. 24, S. 129).

k. Bahngruppe X

Während in den sechs Monaten von Juni bis November nur zwei Tiefdruckgebiete auftreten, fallen mehr als die Hälfte aller Zugbahnen in den Winter. Diese Bahngruppe stellt somit den "reinsten" Wintertyp dar. In der Verteilung der Monatshäufigkeiten kommt die enge Verwandtschaft zur Bahngruppe IX zum Ausdruck, denn das hier wie dort in den Februar fallende Maximum wird bei X noch einmal im Mai erreicht, wenn auch BG IX einen (sekundären) Gipfel aufweist (Vgl. Diag. 25, S. 131).

In dieser Bahngruppe sind alle Richtungen zusammengefaßt, die eng um Nord pendeln (Vgl. Abb. 63/64, S. 132). Dabei zeigt sich, daß die leicht nach Südsüdost gerichteten Bahnen die restlichen überwiegen (Vgl. auch Abb. 29, S. 71). Bei der zu diesen Bahnen gehörenden Großwetterlage handelt es sich um Nordmeeriorlagen, die ja auch für die Bahngruppe IX bestimmend waren. Die reinen Nordbahnen dagegen stellen sich ein, wenn die Höhenströmung auf der Rückseite eines Osteuropatrogos von Nordskandinavien bis nach Mitteleuropa oder sogar bis ins Mittelmeer reicht. Obwohl die Höhenströmung bei diesem "low index" nicht sehr schnell strömt und obwohl ein relativ großer Anteil der Zyklonen ein Höhentief

ausgebildet hat, liegt die Bahngeschwindigkeit mit einem GK von 2,06 überdurchschnittlich hoch.

Tabelle 17 Bahngruppe X

Tiefdrucktypen	Frühling	Sommer	Herbst	Winter	Jahr	%
Kaltfronttief	-	-	-	2	2	6,5
Staffeltief	4	-	-	2	6	19,5
Warmsektorzyklone	1	-	-	-	1	3,0
Okklusionstief	2	-	1	4	7	22,5
Zentralzyklone	2	-	-	2	4	13,0
Deszend. Zykl.	2	-	1	1	4	13,0
Aszend. Zykl.	-	-	-	2	2	6,5
Thermisches Tief	3	-	-	2	5	16,0
Summe	14	-	2	15	31	

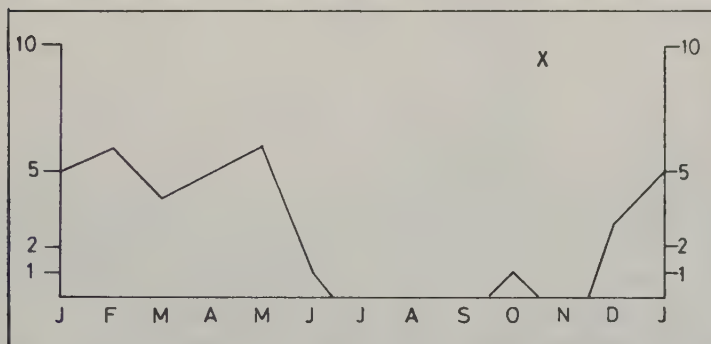


Diagramm 25 Jahresgang der Bahngruppe X

Trotz der engen Verwandtschaft zur Bahngruppe IX, die sich in der Monatshäufigkeit und der Großwetterlage zeigt, muß BG X als eigene Bahngruppe angesehen werden, da sie sich in der Typenverteilung signifikant von ihrem Nachbarn unterscheidet. Dabei sind es vornehmlich die Staffeltiefs, die jetzt zahlenmäßig an zweiter Stelle stehen und die sich gegenüber IX absolut verdoppelt und relativ vervierfacht haben, die zu dem großen χ^2 -Wert von 23,15 beitragen (Vergleich in den Klassen: a) Warmsektorzyklone, b) Okklusionstief, c) Staffeltief und d) Rest). Sie treten nur in den Monaten Februar bis April im Gefolge von Ausbrüchen polarer Kaltluft auf. - Auch die flachen Thermischen Tiefs, die sich im Frühling und Winter im Skagerrak bilden, erreichen jetzt mit

Abb. 63 Bahngruppe X
Frühling

- Staffeltief
- Warmsektorzyklone
- Okklusionstief
- ▽ Zentralzyklone
- Deszend. Zykl.
- ▲ Thermisches Tief

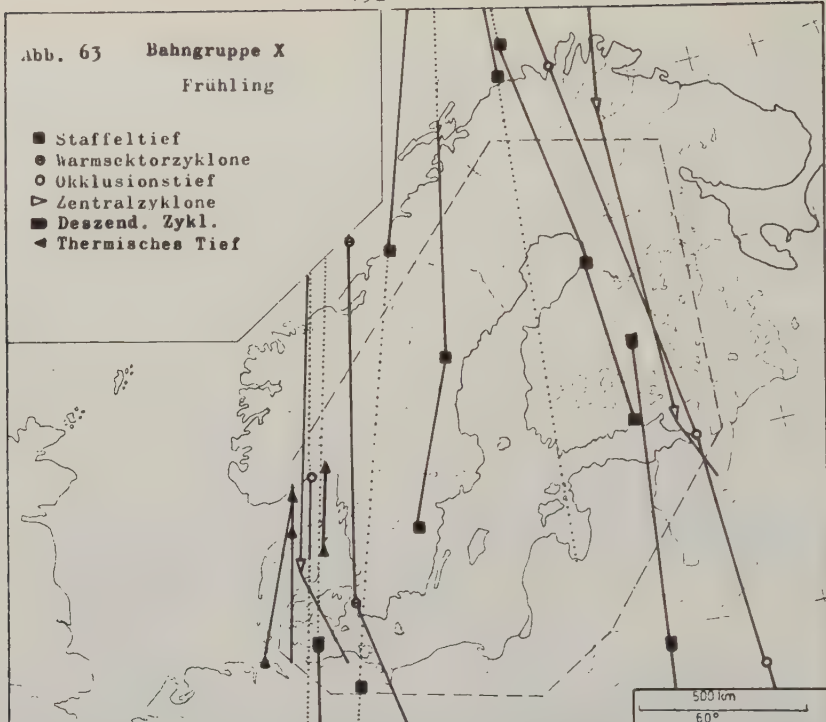
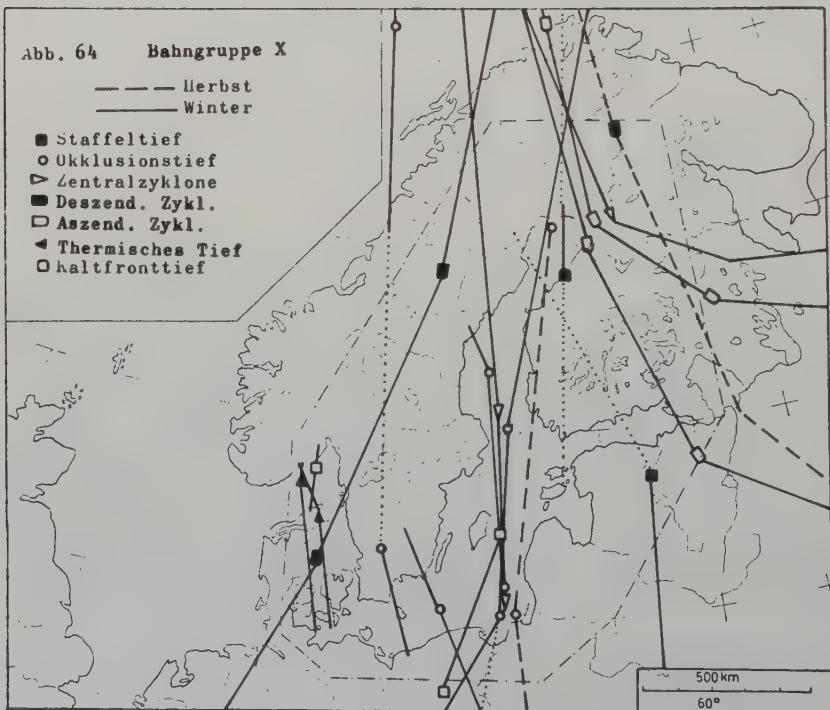


Abb. 64 Bahngruppe X

--- Herbst
— Winter

- Staffeltief
- Okklusionstief
- ▽ Zentralzyklone
- Deszend. Zykl.
- Aszend. Zykl.
- ▲ Thermisches Tief
- Kaltfronttief



16 % ihren höchsten Anteil an einer Bahngruppe.

In der Reihenfolge der gestreckten Bahngruppen rangiert BG X mit 31 Tiefdruckgebieten an letzter Stelle. Die Anzahl der Fälle ist also nur halb so groß wie die der ihr genau gegenüberliegenden Bahngruppe II (Vgl. Abb. 35/36, S. 86). Das gleiche Verhältnis besteht nach G.BAHRENBERG (1968, S. 43) auch zwischen der mitteleuropäischen Nord- und Südbahn, obwohl nach der vereinfachten Wetterlagenstatistik von P.HESS und H.BREZOWSKY (1952) die Nordlagen doppelt so häufig auftreten wie die Süd- und Südostlagen. Eine bloße Drehung der Luftdrucktopographie um 180° führt also keineswegs, wie man vielleicht vermuten könnte, wieder zur gleichen Zyklonenanzahl. Auch in der Typenverteilung sind die beiden Bahngruppen sehr verschieden zusammengesetzt. Läßt man die nur bei je einer Bahngruppe vorkommenden Typen Kaltfrontwelle (II) und Thermisches Tief (X) außer Betracht, da sie ohnehin schon auf die Verschiedenartigkeit hinweisen und vergleicht nur die Typen a) Warmsektorzyklone, b) Okklusionstief, c) Deszendierende Zyklone und d) Rest, dann ist der χ^2 -Wert von 17,6 bei drei Freiheitsgraden auf dem 0,1-Niveau signifikant.

Der Einfluß der sich in Nord-Süd-Richtung erstreckenden Ostsee muß sich bei der reinen Nordrichtung am stärksten bemerkbar machen. So spiegelt sich auch der Temperaturgegensatz Wasser-Land sehr deutlich in der Lage der Zugbahnen wider. Im Herbst beginnt sich das Land im Verhältnis zur Ostsee sehr viel rascher abzukühlen und dieser Temperaturgegensatz verstärkt sich noch weiter bis in den Spätwinter hinein. Die Tiefdruckgebiete bevorzugen deshalb den Weg über das zyklonenerhaltende Wasser der südlichen Ostsee (Vgl. Abb. 64, S. 132), wo sie oft noch einen Impuls zur Vertiefung erhalten. Während im Oktober nur ein Tief auftritt, nimmt die Frequenz im Dezember schlagartig zu, um dann im Februar ihr Maximum zu erreichen. Obwohl die Polarluft, die auf der Rückseite der Zyklonen von Spitzbergen nach Süden transportiert wird, sehr kalt ist, erfährt das lappländische Gebiet durch sie eine relative Erwärmung, weil sich dort oft unter Hochdruckeinfluß, durch Ausstrahlung bedingt, noch weit niedrigere Temperaturen eingestellt haben. Erst über Südfinnland und Mittelschweden macht sich die Kaltluft durch negative Temperaturveränderungen stark bemerkbar. Dabei wird dieser Effekt bei den Zyklonen über der südlichen Ostsee noch dadurch erhöht, daß sie Luftmassen aus dem schwedischen Kaltluftblock in ihren Strömungsbereich einbeziehen,

während bei den Tiefs über Finnland die Temperatur ihre tiefsten Werte erreicht, wenn die Bodenströmung von Nord auf Nordost dreht.

Anfang März erreicht die arktische Kaltluftproduktion ihren Höhepunkt. Die Vorstöße arktischer Polarluft sind dann die Ursache dafür, daß das Abschmelzen des Eises in der Bottenwiek sehr viel später als in der Bottensee erfolgt. Im nördlichen Teil der Bottenwiek wird das Maximum der Vereisung erst Mitte März erreicht, so daß sich das Eis auf See noch lange hält, nachdem die Uferpartien infolge der rasch fortschreitenden Erwärmung des Landes schon eisfrei sind (Vgl. J.BLÜTHGEN, 1940).

Im Frühling kehren sich dann die Temperaturverhältnisse um. Durch die verstärkte Insolation wird das Land rasch erwärmt, während die Ostsee noch lange kalt bleibt, so daß sie einer Zyklonenerhaltung oder einer Zyklognese entgegenwirkt. Sie wird deshalb von den Tiefdruckgebieten westlich und östlich umgangen und trennt damit die Nordrichtung in zwei Bahnstreifen (Vgl. Abb. 63, S. 132). Während die Auswirkungen des östlichen Bahnstreifens das ganze Ostseegebiet ergreifen, beeinflußt der westliche das Gebiet nur noch randlich; ihm kommt eine größere Bedeutung für Mitteleuropa zu. Die flachen Thermischen Tiefs, die sich bei einer nördlichen Bodenströmung über dem Skagerrak bilden, sind mit einigen Konvektionsschauern verbunden, die sich aber auf Dänemark und die angrenzenden Wasserflächen beschränken.

Im Mai erreichen die Zyklonen dieser Bahngruppe ein zweites Maximum (s.o.). Es fällt zusammen mit den verstärkt auftretenden Nordmeerhochlagen, die in diesem Monat die zweithäufigste Wetterlage stellen (Vgl. J.BLÜTHGEN 1966, S. 375). Die Tiefdruckgebiete stehen meistens in einem Zusammenhang mit dem Ausbruch hochreichender Polarluft, was sich auch in dem erhöhten Anteil der Deszendierenden Zyklonen und der Staffeltiefs ausdrückt. Diese Kälterückfälle verursachen im ganzen Ostseegebiet einen ausgeprägten Temperaturrückgang und können in Mitteleuropa, wenn sie im Gefolge von warmen Tagen im März und April auftreten, zu verbreiteten Schadenfrösten führen.

Obwohl die Bahngruppe X einen großen Anteil von hochreichenden Zyklonen aufweist, erreichen die Tiefdruckgebiete insgesamt keine große Intensität. Die IF konzentrieren sich vielmehr überdurchschnittlich stark auf die niedrigen Werte 10/1, 10/2 und 05/2,

während die größeren Werte nur vereinzelt und nicht überdurchschnittlich häufig auftreten (Vgl. Diagr. 26).

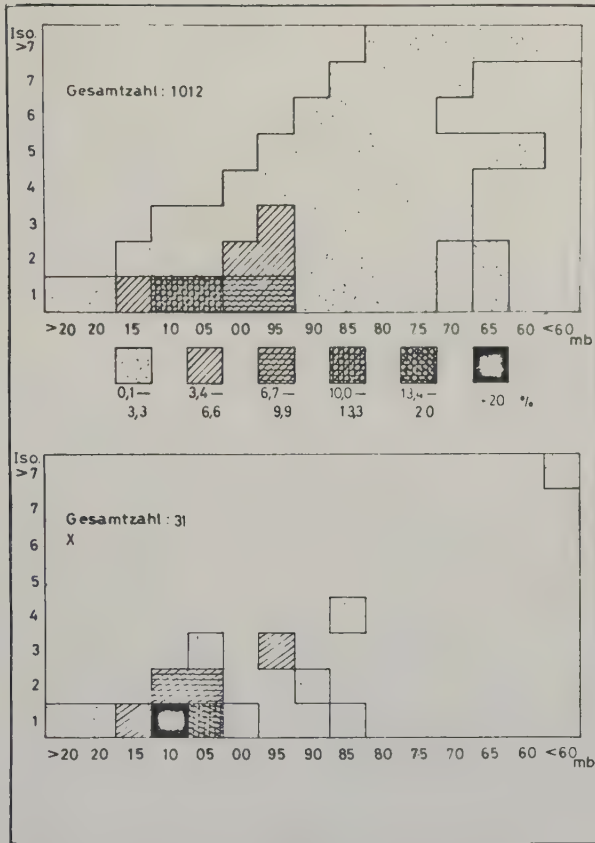
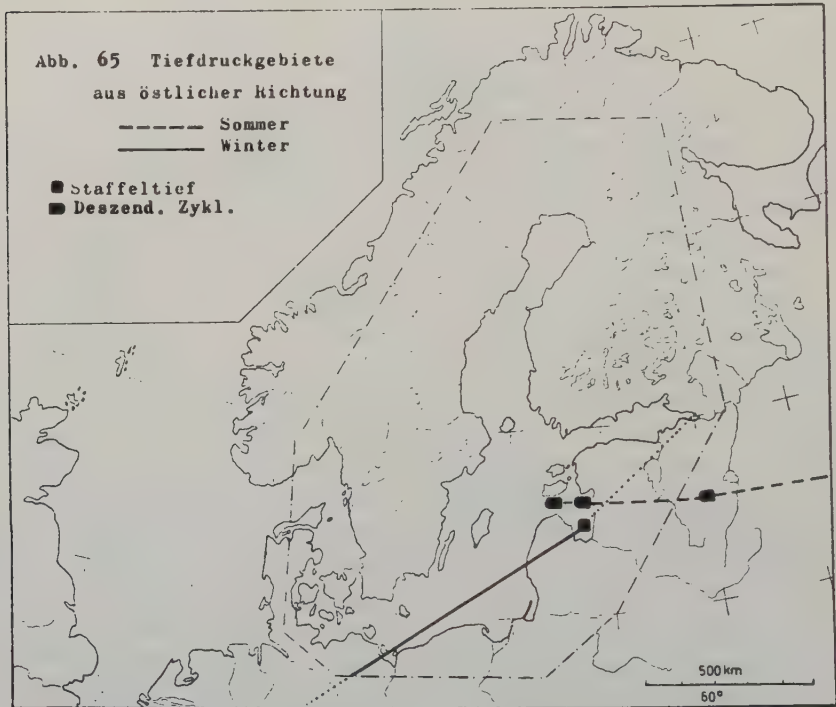


Diagramm 26 Verteilung der Intensitätsfaktoren

Mit der Bahngruppe X ist die Reihe der gestreckten Bahnen zum Abschluß gekommen. Der Vollständigkeit halber müssen aber noch zwei Tiefdruckgebiete erwähnt werden, die nicht in die bisher besprochenen Bahngruppen passen, da sie aus ONO bzw. O in das Untersuchungsgebiet eintreten (Vgl. Abb. 65, S. 136).

Das Staffeltief tritt im Januar auf als ein Hochkeil, der zwischen Island und England hindurch bis zum Nordkap vorstößt, so daß sich zwischen ihm und einem hochreichenden Kaltlufttropfen über der Ukraine eine ostnordöstliche Höhenströmung einstellt. Die

Front einer über dem Eismeer liegenden Zyklone wird dadurch rückläufig, so daß ein flaches Staffeltief, das sich an ihrem Ende gebildet hat, nach Südwesten gesteuert wird. Auf der Rückseite des Tiefs dringt aus dem Bereich des osteuropäischen Kaltlufttropfens Kaltluft nach Südwesten vor, so daß die mit dem Luftmassenwechsel verbundene Bewölkung und leichte Schneefälle die Temperaturen in Ostdeutschland nicht so stark absinken lassen wie weiter im Westen.



Auch bei der Deszendierenden Zyklone im Juni ist ein blockierendes Hoch über Nordeuropa die Ursache für die Westverlagerung. Auf der Ostseite des hohen Drucks schnürt sich in der über das Weiße Meer nach Süden vorstoßenden Kaltluftzunge ein Kaltlufttropfen ab, der sich über dem warmen Land dauerhaft bis zum Boden durchsetzt und in dessen Kern es zu Schauern und Gewittern kommt. Die beiden Druckgebilde führen eine Drehbewegung umeinander

aus, indem das Hoch über Lappland zum Weißen Meer wandert, während die Deszendierende Zyklone nach Westen zieht, wo sie sich mit einem hinter dem abziehenden Hoch aus Nordwesten kommenden Kaltluftvorstoß vereinigt.

3. Die gekrümmten Bahnen

Obwohl die nicht gestreckten Bahnen an der Gesamtzahl der wandernden Bodenzyklonen mit weniger als $1/5$ aller Fälle beteiligt sind, ist der Verlauf der einzelnen Zugbahnen so verschieden, daß nicht weniger als 8 Bahngruppen gebildet werden mußten, um die große Vielfalt zusammenfassen zu können. Neben der Herkunftsrichtung wurde dabei weiter nach der Stärke der Krümmung differenziert, da sich mit ihr auch das Verhältnis zwischen hochreichenden und flachen Zyklonen verändert. Als Grenzwert wurde ein rechter Winkel angenommen und nach der Krümmungsstärke unterschieden in gekrümmte Bahnen (Krümmung geringer als ein rechter Winkel) und retrograde Bahnen (Krümmung größer als ein rechter Winkel).

a. Bahngruppe XI

Die Bahngruppe XI nimmt in mehrerer Hinsicht eine Zwischenstellung zwischen den gestreckten und den stärker gekrümmten retrograden Bahnen ein. Einmal ist die Krümmung ihrer Zugbahnen von allen nicht gestreckten am geringsten, so daß wieder Kaltfrontwellen vertreten sind, die auf der Vorderseite eines breiten Trogas an Kaltfronten von Eismeerzyklonen entlangwandern. Zweitens übertrifft sie an Typenvielfalt nicht nur die ziemlich gleichförmig zusammengesetzten stärker gekrümmten Bahnengruppen, sondern auch die gestreckte Bahngruppe III, und drittens liegt sie mit einem Anteil von nur $1/3$ hochreichenden Zyklonen in der Typenzusammensetzung noch hinter Bahngruppe VI. Mit dieser Bahngruppe hat sie auch die Herkunftsrichtung gemein, denn auch hier treten die Zyklonen, von England kommend, südlich des norwegischen Gebirges in den Ostseeraum ein. Über Süd- und Mittelschweden verlassen sie dann aber diesen Kurs und biegen nach Nordosten um (Vgl. Abb. 66/67, S. 138). Dieses Ausscheren aus der Westrichtung macht sich auch in dem GK bemerkbar, der zwar mit 1,9 den höchsten Wert der nichtgestreckten Bahngruppen aufweist, der aber doch etwas unter dem von Bahngruppe VI ($GK = 2,00$) liegt.

Abb. 66 Bahngruppe XI

----- Frühling
 ----- Sommer

- Kaltfrontwelle
- Staffeltief
- Warmsektorzyklone
- Okklusionstief
- ▽ Zentralzyklone
- Ascend. Zykl.

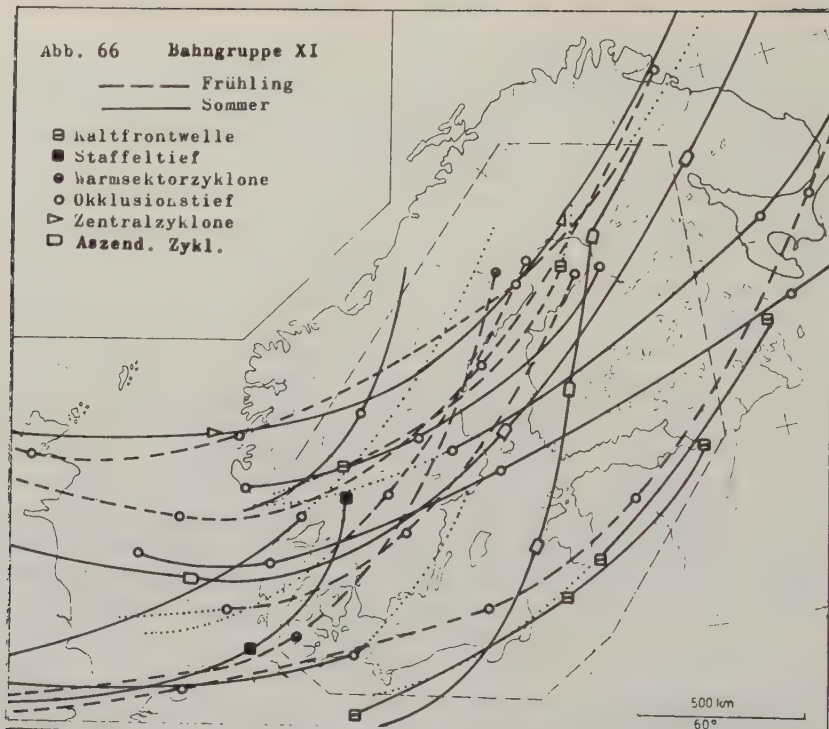
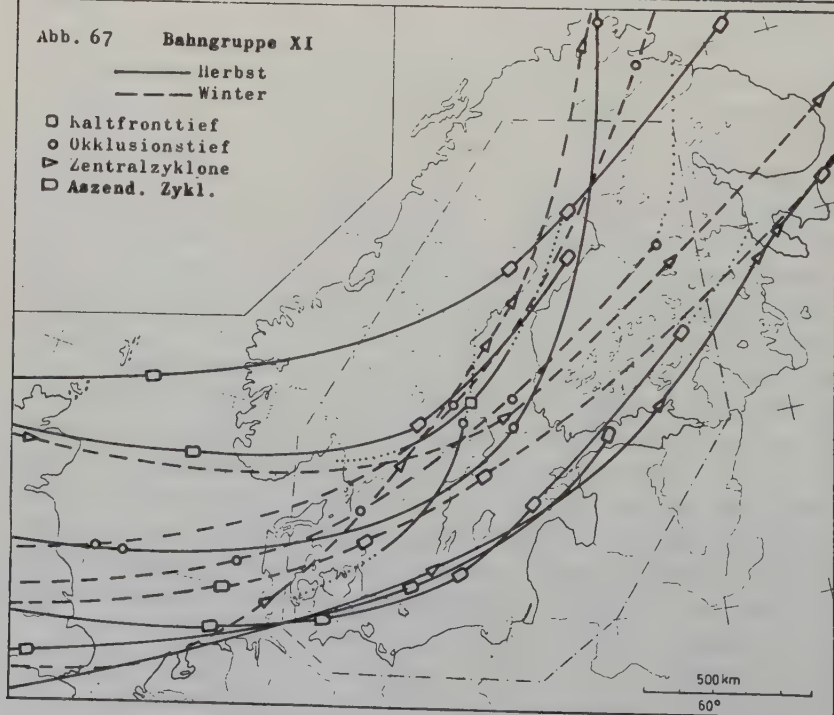


Abb. 67 Bahngruppe XI

----- Herbst
 ----- Winter

- Kaltfronttief
- Okklusionstief
- ▽ Zentralzyklone
- Ascend. Zykl.



Die Krümmung der Bahngruppe XI ist nicht, wie z.B. bei den retrograden Bahnen, durch einen größeren Anteil an selbststeuernden hochreichenden Zyklonen bedingt, sondern sie ist abhängig von einem steuernden Tief über dem Nordmeer, das dort stationär liegenbleibt oder doch sehr viel langsamer nach Osten wandert als bei Bahngruppe VI, so daß die Randstörungen Zeit haben, es auf seiner Südostseite zu umrunden.

Tabelle 18 Bahngruppe XI

Tiefdrucktypen	Frühling	Sommer	Herbst	Winter	Jahr	%
Kaltfrontwelle	1	2	-	-	3	9,5
Kaltfronttief	-	-	1	-	1	3,0
Staffeltief	-	1	-	-	1	3,0
Warmsektorzyklone	1	-	-	-	1	3,0
Okklusionstief	5	6	2	2	15	47,0
Zentralzyklone	-	1	1	2	4	12,5
Aszend. Zykl.	-	2	4	1	7	22,0
Summe	7	12	8	5	32	

Trotz der Ähnlichkeit mit den gestreckten Bahnen zeigt sich doch eine stärkere Verschiedenheit in der Typenverteilung gegenüber den Bahngruppen III bis VI. So ist der χ^2 -Wert von 14,48 beim Vergleich mit Bahngruppe VI in den Klassen a) Okklusionstief, b) Aszendierende Zyklone und c) Rest bei zwei Freiheitsgraden auf dem 0,1-Niveau signifikant. Daran sind die Aszendierenden Zyklonen, die bei dieser Bahngruppe mehr als 1/5 aller Fälle ausmachen, am stärksten beteiligt. Nur zwei von ihnen bilden allerdings unter Vertiefung ein eigenes Höhentief über der Ostsee aus, während der Rest sich zu einem hochreichenden Wirbel entwickelt, indem sich die Randstörung mit einem vom Nordmeer nach Osten wandernden Kaltlufttropfen vereinigt.

Die räumliche Verteilung der Einzelbahnen (Vgl. Abb. 66/67, S. 138) zeigt keinen markanten Umkehrpunkt, was bei der geringen Krümmung der Bahn auch kaum zu erwarten ist, aber die Tiefdruckgebiete passen sich doch dem Relief an, indem die Meeresflächen der Nord- und Ostsee bevorzugt und das norwegische Gebirge gemieden wird. Allerdings wird der Weg über die südliche Ostsee nur im Herbst und im Winter und dann gerade von den hochreichenden Tiefdruckgebieten begangen, während im Frühjahr und Sommer dieses Gebiet ausgespart wird.

Ebenso wie bei der Bahngruppe IV, deren Verlauf sich die Tiefs nach dem Abbiegen in etwa angleichen, ist auch hier die zyklonenetische Wirkung des Skagerraks, besonders im Sommer, zu bemerken. Zieht ein Zentraltief von Schottland zum Nordmeer, dann wirkt das südnorwegische Gebirge wie ein Keil, der das senkrecht auftreffende Frontensystem vom Muttertief trennt. Vielleicht wird diese Wirkung sogar noch verstärkt durch die große Anzahl von Hochs, die sich im Durchschnitt über Südnorwegen finden (Vgl. S.EVJEN, 1954). Während der Kern als frontenloses Kaltes Tief vor Norwegen nach Nordosten weiterzieht, entsteht über dem Skagerrak an der Front eine Resonanzbildung mit eigenen geschlossenen Isobaren, die aber immer noch innerhalb der Mehrzahl der Isobaren des Muttertiefs bleibt. Ist die Randstörung kräftig genug, erfolgt oft eine Wiedervereinigung mit dem Kern bei Spitzbergen.

Mit Ausnahme von Norrland und Lappland wird von dieser Bahngruppe das gesamte Ostseegebiet zyklonal beeinflusst. Da sich die Tiefdruckgebiete meist schon über der Nordsee im Stadium der Okklusion befinden, sind es vorwiegend feuchte maritim-polare Luftmassen, die in den Ostseeraum verfrachtet werden und die zu verbreiteten Niederschlägen führen. Im April, in dem die meisten Tiefs des Frühlings auftreten (Vgl. Diagr. 27), wehen in der südlichen Ostsee starke Südwestwinde, die aber nicht die Sturmstärken der kalten Jahreszeit erreichen. Im Herbst und Winter überwiegen die hochreichenden Tiefdruckgebiete, von denen die Aszendierenden Zyklonen den größten Anteil innehaben. Begünstigt durch die warme Unterlage der Ostsee vertiefen sich die Zyklonen mit Höhentief zu ausgesprochenen Sturmwirbeln, hinter denen arktische Polarluft aus Nordwest den Ostseeraum überschwemmt.

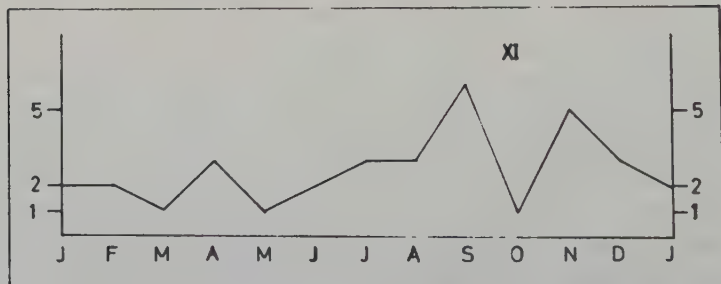


Diagramm 27 Jahresgang der Bahngruppe XI

Die stärkere Verwirbelung der Tiefs kommt auch im Intensitätsdiagramm zum Ausdruck. Obwohl die flachen Tiefdruckgebiete noch in der Überzahl sind, liegt der Schwerpunkt auf dem IF 00/1, der damit überdurchschnittlich stark vertreten ist (Vgl. Diagr. 28). Da zum zyklonalen Ausscheren aus einer geraden Bahn immer eine größere Verwirbelungsenergie notwendig ist, treten maximale Kerndrücke über 1010 mb bei dieser Bahngruppe nicht auf. Dagegen reicht die Skala der intensiven IF-Werte bis an den oberen Rand der Extremwerte.

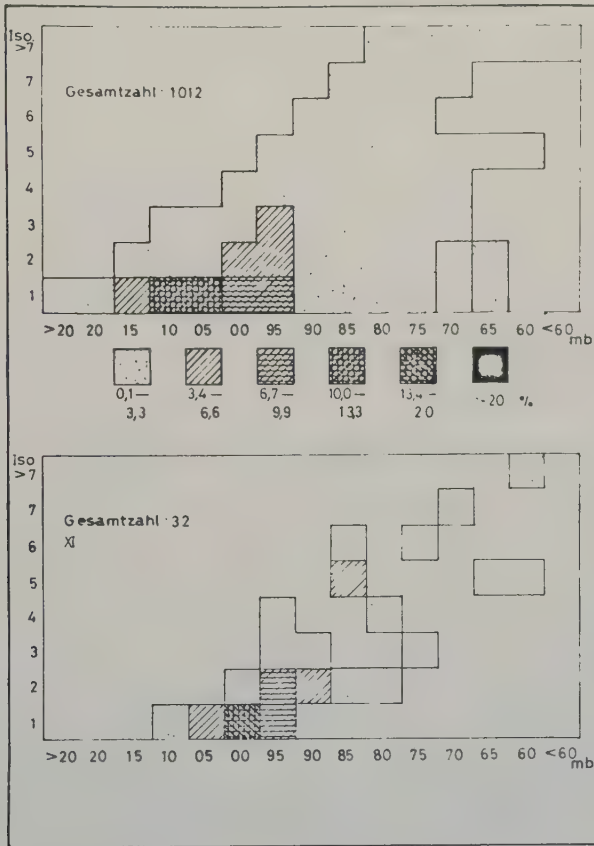


Diagramm 28 Verteilung der Intensitätsfaktoren

b. Bahngruppe XII

Die Zugbahnen der Tiefdruckgebiete, die sich auf Bahngruppe XII bewegen, verlaufen hauptsächlich von Island zwischen Schottland und Norwegen hindurch nach Süd- und Mittelschweden und von dort über den finnischen Meerbusen nach Nordrußland (Vgl. Abb. 68/69, S. 143). Während die Einzelbahnen im Frühling und Sommer breiter gestreut sind, ist die Bündelung im Herbst und Winter so ausgeprägt wie bei keiner anderen Bahngruppe, so daß man hier erstmalig von einer echten Zugstraße der Zyklonen sprechen kann. Daß der Verlauf der Bahngruppe XII auch im Mittelwert wiederkehrt, zeigt eine Karte von W.KÖPPEN (1917), in der eine der Hauptbahnen genau mit dem Verlauf der Bahngruppe XII zusammenfällt (Bahn IIIb bei J.v.BEBBER). Da dort die jährliche Frequenz mit 8 Tiefs angegeben ist, müßten hier für 10 Jahre rund 80 Fälle vorliegen. Daß in der Bahngruppe XII aber nur 42 Zyklonen auftreten, kann seinen Grund darin haben, daß es sich hier um echte Einzelbahnen handelt, während die Bahn bei W.KÖPPEN einen Mittelwert darstellt, dessen Streubreite sehr viel größer sein kann. Auch der nur 10 Jahre umfassende Untersuchungszeitraum kann für eine solche Schwankung verantwortlich sein.

Tabelle 19 Bahngruppe XII

Tiefdrucktypen	Frühling	Sommer	Herbst	Winter	Jahr	%
Kaltfrontwelle	1	-	-	1	2	5,0
Kaltfronttief	-	-	1	1	2	5,0
Staffeltief	-	2	-	-	2	5,0
Okklusionstief	3	3	1	4	11	26,0
Zentralzyklone	-	1	3	4	8	19,0
Deszend. Zykl.	4	1	-	-	5	11,0
Aszend. Zykl.	2	4	3	3	12	28,5
Summe	10	11	8	13	42	

Die Tiefdruckgebiete der Bahngruppe XII folgen einer trogförmig ausgebuchteten Höhenströmung, die zwischen einem blockierenden atlantischen Hoch und einem Höhentief über dem Eismeer hindurchführt. Die im Vergleich zur Bahngruppe XI stärkere Krümmung, die sich schon einem rechten Winkel annähert, läßt auf eine größere Verwirbelungstendenz schließen. Diese wird auch durch die Typenverteilung belegt, denn erstmalig besitzt mehr als die Hälfte aller Zyklonen ein Höhentief oder bildet dieses im Ostseeraum aus.

Abb. 68 Bahngruppe XII

--- Frühling
— Sommer

- ⊠ Kaltfrontwelle
- Staffeltief
- Okklusionstief
- ▽ Zentralzyklone
- Deszend. Zykl.
- Aszend. Zykl.

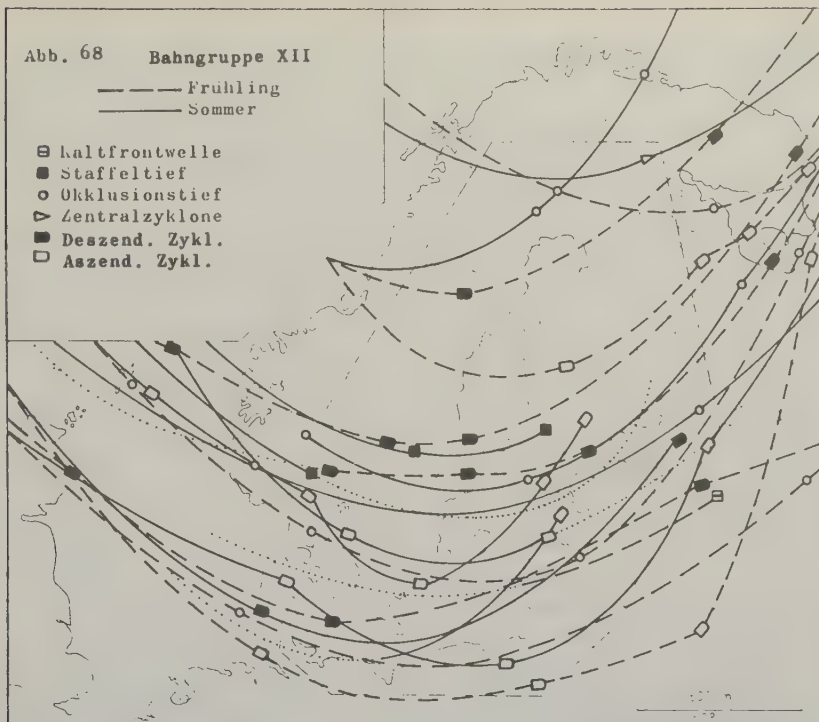
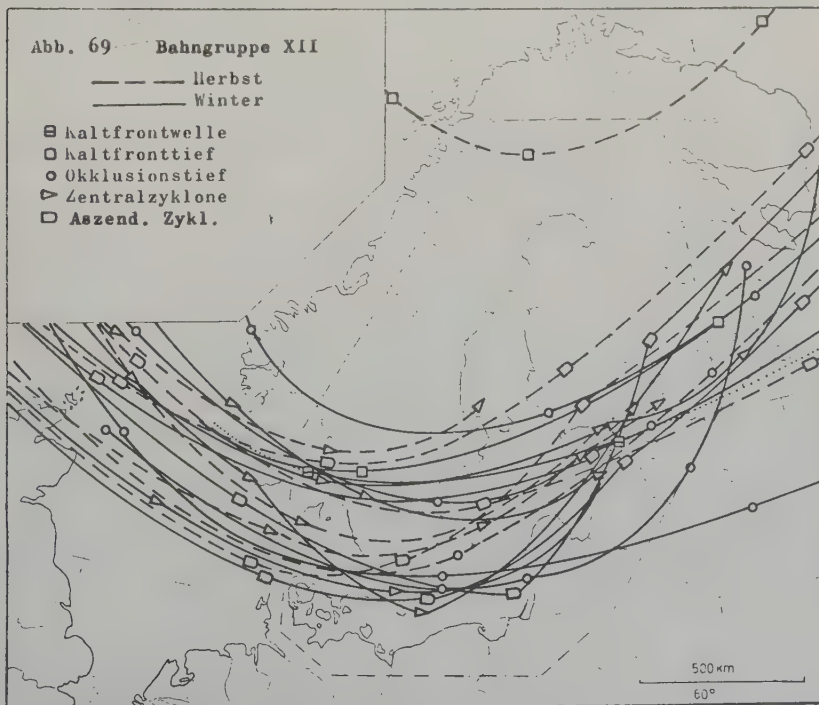


Abb. 69 Bahngruppe XII

--- Herbst
— Winter

- ⊠ Kaltfrontwelle
- Kaltfronttief
- Okklusionstief
- ▽ Zentralzyklone
- Aszend. Zykl.



Beim Vergleich mit Bahngruppe XI in den Klassen a) Zyklonen mit Höhentief und b) Rest erreicht der χ^2 -Wert von 8,39 bei einem Freiheitsgrad eine Signifikanz auf dem 0,1-Niveau.

Wie Tabelle 19 (S. 143) zeigt, treten auch die Okklusionstiefs erstmalig nicht mehr dominant auf, sondern ihre Zahl wird von den Aszendierenden Zyklonen übertroffen, die hier auch absolut an der Spitze stehen. Auch diese Schwerpunktverlagerung deutet auf eine stärkere Verwirbelungstendenz hin. Mit der Ausbildung eines Höhentiefs geht, was bei den anderen Bahngruppen nicht immer der Fall war, stets eine Vertiefung im Bodendruckfeld einher, wobei ein 24-stündiger Druckfall von mehr als 15 mb keine Seltenheit ist. Auch in der Höhe kann sich die zyklonale Rotation stark ausweiten, so daß, wie am 17. August 1961, der Wirbel noch im 30 mb-Niveau (25 km Höhe!) zu erkennen ist. Da sich die Ausbildung eines Höhentiefs fast immer über Südschweden vollzieht, ist eine Mitwirkung des südnorwegischen Berglandes nicht auszuschließen. Weitaus größeren Einfluß auf die Vertiefung und Intensivierung dürfte aber der Kaltluftausbruch aus Nordwesten haben, der stets auf der Rückseite der Zyklonen erfolgt. Dies wird durch die Tatsache belegt, daß die meisten Aszendierenden Zyklonen im Sommer auftreten, wenn die nach Norden gerichteten Azorenhochvorstöße Kaltluftausbrüche nach Südosten aktivieren.

Infolge des höheren Anteils an Zyklonen mit Höhentief hat der relative Anteil der langsamen Wanderungen gegenüber Bahngruppe XI zugenommen, so daß der GK mit 1,73 einen etwas geringeren Wert aufweist, obwohl bei beiden gekrümmten Bahngruppen schnelle Wanderungen in 10 % aller Fälle vorkommen.

Der Ausbruch arktischer Polarluft, der für die Intensivierung und Richtungsänderung der Zyklonen verantwortlich ist, läßt die Temperaturen zu allen Jahreszeiten unter den Mittelwert absinken. Während die monatlichen Häufigkeiten von Januar bis Mai ziemlich gleichmäßig verteilt sind, tritt der Jahresgipfel im Juni mit 7 Fällen ausgeprägt hervor, und auch der Juli erreicht noch mit 5 Fällen einen hohen Anteil (Vgl. Diag. 29, S. 145). Da die Einzelbahnen im Frühling und Sommer sehr breit gestreut liegen, wird von den Kaltlufteinbrüchen das gesamte Ostseegebiet erfaßt. In Lappland können dabei die Temperaturen Anfang Juni noch einmal unter den Gefrierpunkt absinken, während in den südlicheren Gebieten der gut erkennbare Temperaturrückgang im positiven Bereich bleibt.

Bis auf ein Kaltfronttief konzentrieren sich die Tiefdruckbahnen im Herbst und Winter südlich des norwegischen Berglandes (Vgl. Abb. 69, S. 143). Die gesamte nördliche Hälfte wird deshalb von den Frontalvorgängen unmittelbar nicht berührt, doch kann sich die abgehobene Warmluft auf der Vorderseite kräftiger Zyklonen in einem Aufgleitschirm so weit nach Norden erstrecken, daß auch die Gebiete nördlich des 60. Breitenkreises verbreitete Niederschläge erhalten.

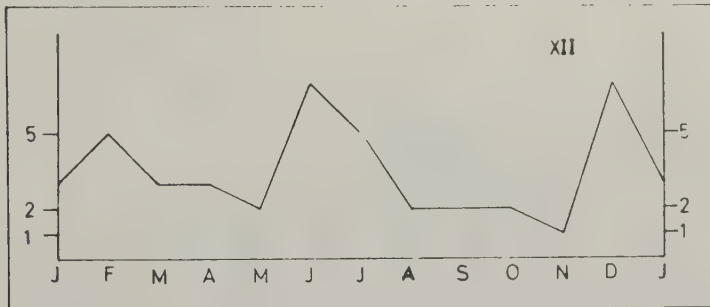


Diagramm 29 Jahresgang der Bahngruppe XII

Da die hochreichenden Zyklonen in dieser Jahreszeit einen ausgesprochen niedrigen Kerndruck aufweisen, ist ihr Durchzug immer mit heftigen Stürmen verbunden, die allerdings ihre größte Stärke fast immer schon über der Nordsee erreichen. Aber auch in der südlichen Ostsee ist ihre Stärke noch beträchtlich, so daß Sturmfluten an der deutschen Ostseeküste keine Seltenheit sind. Neben Bahngruppe XIV ist es besonders Bahngruppe XII, die für zerstörerische Sturmfluten verantwortlich ist. Bei Annäherung der Zyklonen fluten die Wassermassen zuerst bei südwest- bis westlichen Winden in die Ostsee hinein, von wo sie darnach Durchzug der Zyklonen durch nord- bis nordöstliche Rückseitenwinde gegen die deutsche Ostseeküste gedrückt werden. - Der tiefste im Untersuchungszeitraum festgestellte Druck trat bei dem Nordsee-Orkantief vom Februar 1962 auf, als sich die Zyklone unter stetiger Vertiefung in das Ostseegebiet verlagerte und am 13. Februar um 0 Uhr über dem finnischen Meerbusen einen Kerndruck von 945 mb ! erreichte. Entlang der Zugbahn wurde dabei in der Nähe des Kerns Westwind mit Stärke 8 und am nächsten Tag in Memel

NW & gemessen. Das Schneefallgebiet erstreckte sich bei diesem riesigen System, das maximal 15 geschlossene Isobaren aufwies, von Polen bis zum Eismeer. Auch das Orkantief vom Februar 1965, das sich allerdings über der südlichen Ostsee schon aufzufüllen begann, bewegte sich innerhalb der Bahngruppe XII (Vgl. H.KRUHL, 1965).

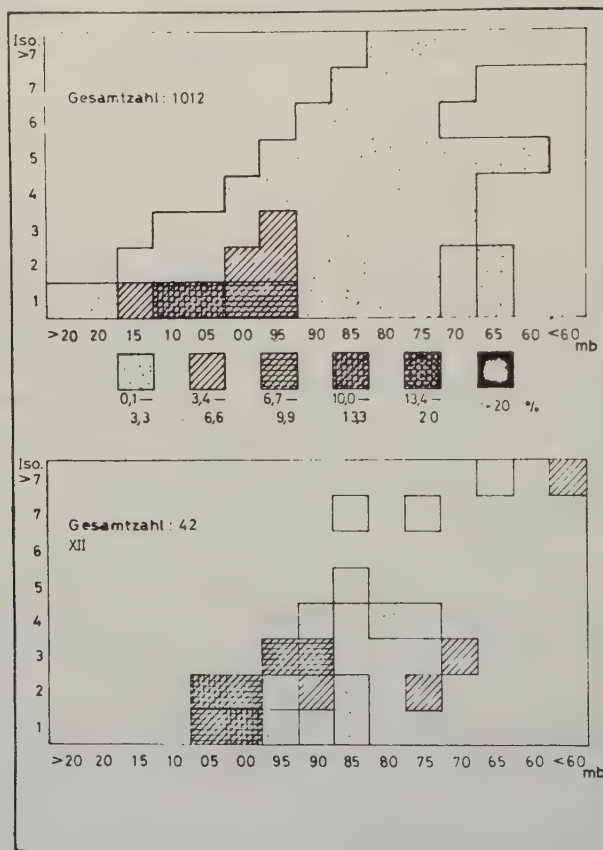


Diagramm 30 Verteilung der Intensitätsfaktoren

Daß es sich bei Bahngruppe XII um eine der intensivsten Bahnen handelt, zeigt sich auch in der Verteilung der Intensitätsfaktoren (Vgl. Diagr. 30). Wegen der großen Verwirbelungstendenz auf dieser Bahn, die vornehmlich über freie Wasserflächen führt, liegt allein hier der Kerndruck der flachsten Zyklonen noch unter 1010 mb und weicht damit erheblich vom Durchschnitt ab. Fast die Hälfte aller Zyklonen (20 Fälle) erreichen einen intensiveren IF als 95/3.

4. Die retrograden Bahnen

Die Bahnen, die hier zusammengefaßt wurden, weisen alle eine stärkere Krümmung als ein rechter Winkel auf. Die Drehrichtung kann dabei sowohl zyklonal (Bahngruppen XIII - XV) als auch antizyklonal (Bahngruppen XVI und XVII) verlaufen.

a. zyklonal gekrümmt

aa.) Bahngruppe XIII

Diese Bahngruppe ähnelt stark der Bahngruppe XI (Vgl. S. 126 ff), denn hier wie dort treten die aus Südwesten kommenden Tiefdruckgebiete südlich des norwegischen Berglandes in den Ostseeraum ein und erreichen ihren Umkehrpunkt über Mittelschweden (Vgl. Abb. 70/71, S. 149). Auch in der Typenverteilung besteht kein signifikanter Unterschied, denn bei einem Vergleich in den Klassen a) Zyklonen mit Höhentief und b) Rest erreicht der χ^2 -Koeffizient nur den Wert von 1,77; er sagt bei einem Freiheitsgrad aus, daß eine überzufällige Verschiedenheit in der Typenzusammensetzung der Bahngruppe nur mit 75 - 90 % Wahrscheinlichkeit gegeben ist, so daß die Nullhypothese (= Hypothese, daß in der Verteilung in beiden Bahngruppen kein signifikanter Unterschied besteht) nicht widerlegt werden kann. Trotz dieser Ähnlichkeiten wurde Bahngruppe XIII nicht mit Bahngruppe XI vereinigt, denn einmal unterscheidet sich die jahreszeitliche Verteilung sehr wesentlich voneinander, da Bahngruppe XIII ausschließlich im Frühjahr und Sommer begangen wird (Vgl. Diag. 31), und zweitens ist die Richtungsänderung der Einzelbahnen über Mittelschweden sehr viel stärker, so daß der Nordwestraum des Ostseegebietes auf der warmen Seite der Zyklonen

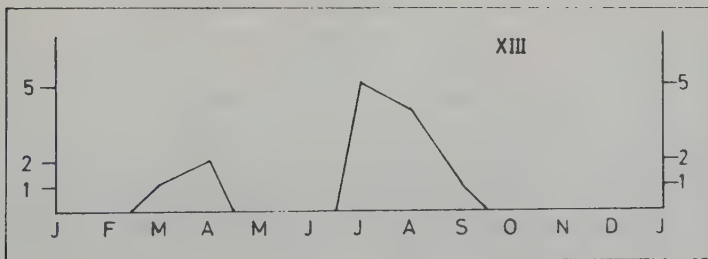


Diagramm 31 Jahresgang der Bahngruppe XIII

zu liegen kommt. Ein starkes blockierendes Hoch über Nordrußland schafft die Voraussetzung für die synoptische Situation dieser Bahngruppe.

Tabelle 20 Bahngruppe XIII

Tiefdrucktypen	Frühling	Sommer	Herbst	Winter	Jahr
Staffeltief	-	2	-	-	2
Okklusionstief	3	2	-	-	5
Zentralzyklone	-	2	-	-	2
Deszend. Zykl.	-	1	-	-	1
Aszend. Zykl.	-	3	-	-	3
Summe	3	10	-	-	13

Durch das Hoch wird die aus westlichen Richtungen kommende Höhenströmung nach Norden bis Nordwesten abgelenkt, so daß ein Trog entsteht, dessen Achse sich von Grönland bis zur Nordsee erstreckt. Erfolgt von Süden her dann noch ein Azorenhochvorstoß gegen die Flanke des Troges, dann wird dieser so stark verengt, daß sich in ihm oft ein Kaltlufttropfen abschnürt, der für die Steuerung der Zyklonen maßgebend ist. Durch ihn werden die flachen Tiefdruckgebiete, die in der Rückseitenströmung des Troges herankommen, in einem engen Bogen um die Spitze des Troges herum wieder nach Nordwesten geführt. Auch bei den Zyklonen mit Höhentief ist immer ein Kaltlufttropfen, der anfangs noch weiter im Norden liegt, an der Steuerung beteiligt, so daß sich die beiden Höhentiefs gewissermaßen umkreisen.

Infolge der starken Krümmung und der im nördlichen Teil gegen die allgemeine Westwinddrift gerichteten Bewegungsrichtung ist die Geschwindigkeit mit 1,23 am geringsten von allen Bahngruppen. Schnelle Wanderung kommt überhaupt nicht und mittlere nur dreimal vor.

Im Frühjahr treten nur drei Okklusionstiefs auf (Vgl. Abb. 70, S. 149). Während auf ihrer Rückseite labil geschichtete Polarluft (Aprilwetter) bis nach Finnland vordringt, wird auf ihrer Vorderseite ein Warmluftstrom aus dem russischen Hoch heraus nach Nordwesten in Bewegung gesetzt, der im nördlichen Ostseegebiet zu erheblichen Temperaturerhöhungen führt. So stieg die Temperatur am 7. April 1962 innerhalb von 24 Stunden in Sodankylä bei Südostwind von -12° auf $+1^{\circ}$.

Abb. 70 Bahngruppe XIII
Frühling

○ Okklusionstief

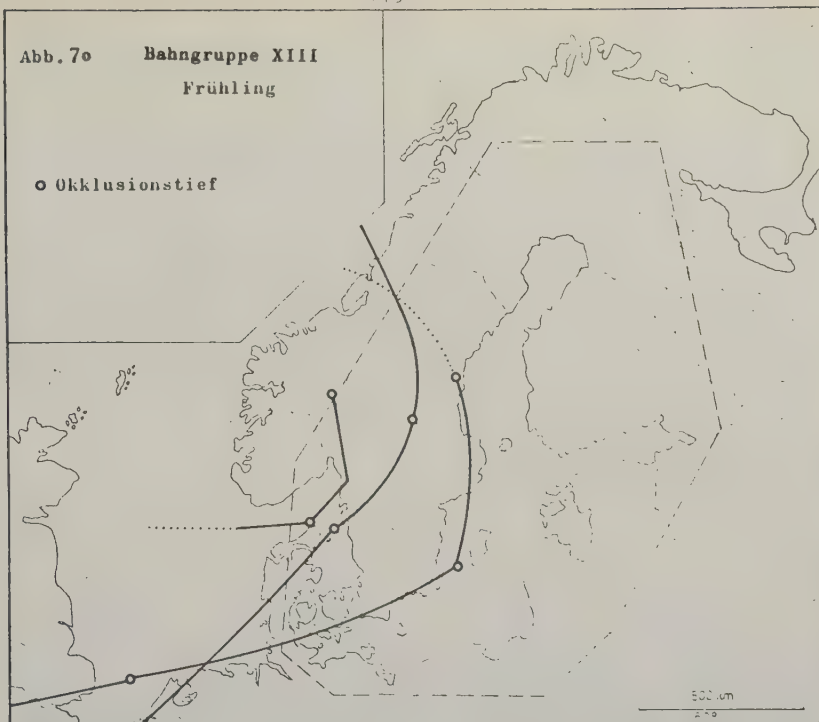
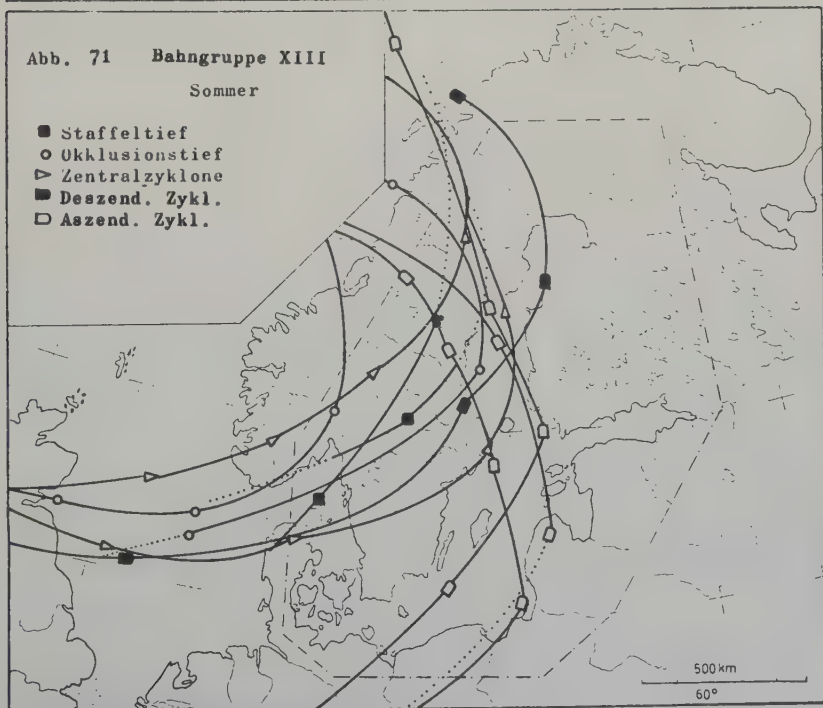


Abb. 71 Bahngruppe XIII
Sommer

- Staffeltief
- Okklusionstief
- ▽ Zentralzyklone
- Deszend. Zykl.
- Aszend. Zykl.



Während Mai und Juni frei bleiben, konzentriert sich das Maximum mit 5 bzw. 4 Fällen auf die Monate Juli und August. In diesen Monaten ist die verstärkte Intensität der Kaltluftzufuhr auf der Trogrückseite das entscheidende Merkmal dieser Bahngruppe, was auch im Auftreten der Deszendierenden Zyklonen und der Staf-feltiefs zum Ausdruck kommt. Da die Zugbahnen weiter östlich verlaufen als im Frühjahr (Vgl. Abb. 71, S. 149), setzt sich auch die polare Rückseitenkaltluft mit Schauern und Gewittern weiter nach Osten und Nordosten durch, während der noch geöffnete Warmsektor der hochreichenden Zyklonen außerhalb des Gebietes vorbeizieht.

ab.) Bahngruppe XIV

Diese Bahngruppe ähnelt in ihrer Herkunftsrichtung Bahngruppe XII, aber während sich dort die für die Steuerung maßgebende Höhenströmung in einem breiten Trog von Island nach Nordrußland erstreckte, wird sie hier durch ein blockierendes russisches Hoch aus dieser Bahn abgelenkt und über der mittleren Ostsee zu einer scharfen Richtungsänderung nach Norden gezwungen. Die Großwetterlage weist also die gleiche Konstellation wie eine mitteleuropäische Winkelwestlage; nur ist die Zirkulation hier weiter nach Norden verschoben, so daß der Umkehrpunkt der Höhenströmung in das Ostseegebiet fällt.

Die Zugbahnen der Tiefdruckgebiete konzentrieren sich in dem Gebiet zwischen Südnorwegen und Dänemark, wobei wie bei Bahngruppe XII die Bandbreite im Frühling und Sommer größer ist als in der kalten Jahreszeit (Vgl. Abb. 72/73, S. 152). Im Herbst und Winter sind die Vertiefungs- und Verwirbelungstendenzen sehr viel geringer ausgeprägt als im Frühling oder Sommer, so daß nur ein Tief den Ostseeraum wieder verläßt, während der Rest innerhalb des Gebietes abstirbt, sobald nach dem Übertritt vom warmen Wasser auf das kalte Land eine weitere Energiezufuhr nicht mehr gegeben ist.

Tabelle 21 Bahngruppe XIV

Tiefdrucktypen	Frühling	Sommer	Herbst	Winter	Jahr	%
Okklusionstief	4	2	1	2	9	30,0
Zentralzyklone	3	2	4	2	11	37,0
Deszend. Zykl.	1	1	-	1	3	10,0
Aszend. Zykl.	2	3	-	2	7	23,0
Summe	10	8	5	7	30	

Als typisches Merkmal der stark gekrümmten Bahnen weist Bahngruppe XIV nur noch eine geringe Typenvielfalt auf, denn von den insgesamt 11 im Ostseeraum vorkommenden Typen sind hier noch vier beteiligt. Während sich die flachen Tiefs auf den okkludierten Typ beschränken, erreichen die Zyklonen mit Höhentief infolge der gegenseitigen Abhängigkeit von scharfer Richtungsänderung und verstärkter Verwirbelungstendenz einen Bahnanteil von 70 %, der nur noch von der Bahngruppe XV übertroffen wird. An diesem hohen Prozentsatz sind die Zentralzyklonen am stärksten beteiligt, denn mit mehr als 1/3 aller Fälle erreichen sie hier den höchsten Anteil von allen Bahngruppen.

Da die hochreichenden Zyklonen stark überwiegen, liegt der GK mit 1,53 beträchtlich unter dem Durchschnitt. Langsame Wanderung kommt in mehr als der Hälfte aller Fälle vor, während eine schnelle Wanderung nur einmal von einer Aszendierenden Zyklone erreicht wird, die sich im Frühjahr unter Vertiefung um 15 mb mit 55 km/h von den Shetlands über den finnischen Meerbusen zur Kola-Halbinsel verlagert.

Obwohl bei dem Vergleich der Bahngruppen XII und XIV in den Klassen a) Zyklonen mit Höhentief und b) Rest der χ^2 -Wert von 2,18 bei einem Freiheitsgrad nicht signifikant ist, wurde eine Trennung in zwei selbständige Bahngruppen vorgenommen, da infolge des unterschiedlichen Bahnverlaufs der Witterungseinfluß für die nordöstlichen Teile des Untersuchungsraumes besonders im Herbst und Winter unterschiedlich ist. Wenn in dieser Jahreszeit die Tiefdruckgebiete über der Ostsee stationär werden, zieht das okkludierte Frontensystem auf der Ostseite nach Norden. Verbunden mit starken Schneefällen drängt dann die maritime Polarluft die kältere Festlandluft zurück. Dadurch wird nicht nur die Frostgrenze über das Baltikum hinaus weit nach Osten verlagert, sondern die Erwärmung setzt sich auch mit südlichen Winden bis zur Kola-Halbinsel durch. Größere Zentralzyklonen können sogar mittelmee-rische Warmluft in ihren Strömungsbereich einbeziehen, die dann von Rußland über Nordskandinavien nach Westen geführt wird und eine weitere Kaltluftzufuhr auf der Rückseite unterbindet. Auch in diesen Luftmassen kommt es beim Aufgleiten auf den lappländischen Kaltluftblock zu verbreiteten Schneefällen. Bis auf die Deszendierende Zyklone, die eine bemerkenswerte Frostverschärfung in der DDR und in Polen verursacht, indem skandinavische Kaltluft nach Südosten in Bewegung gesetzt wurde, ist im Herbst und Winter

Abb. 72 Bahngruppe XIV

—— Frühling
 - - - Sommer

- Okklusionstief
- △ Zentralzyklone
- Deszend. Zykl.
- Aszend. Zykl.

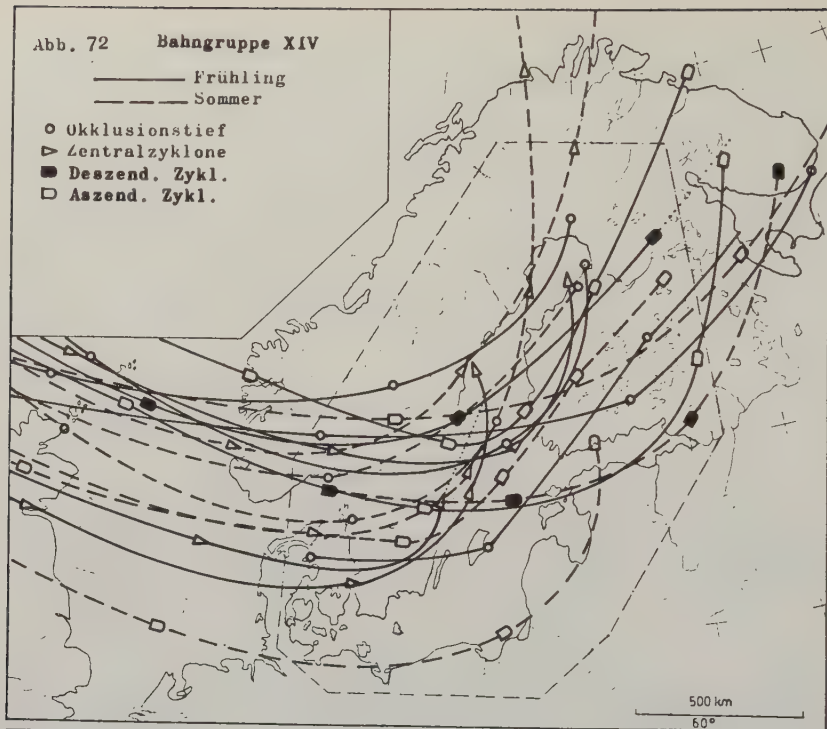
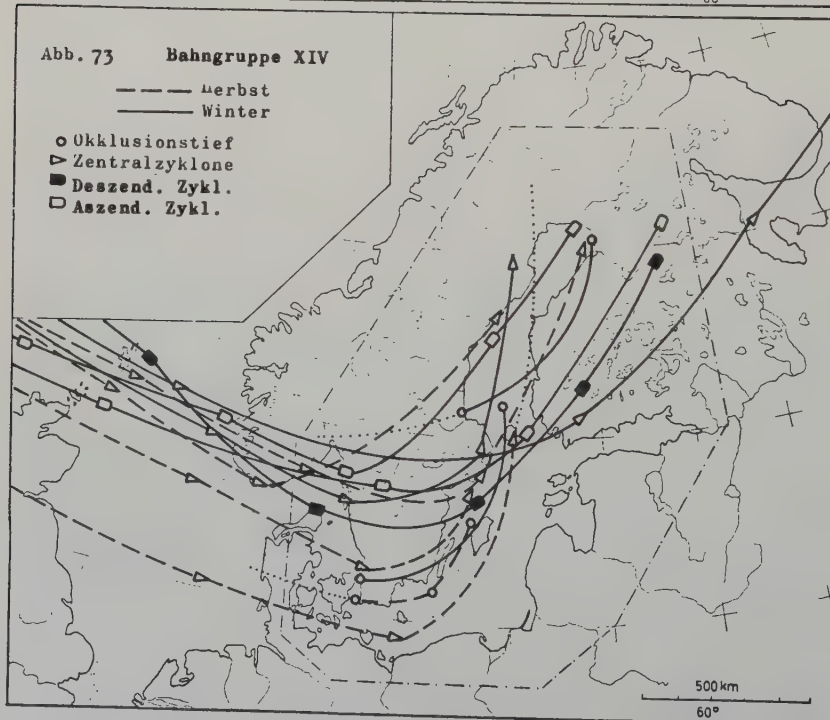


Abb. 73 Bahngruppe XIV

- - - Herbst
 — Winter

- Okklusionstief
- △ Zentralzyklone
- Deszend. Zykl.
- Aszend. Zykl.



die Stärke der Kaltluftausbrüche aber gering.

Im Frühjahr, wenn die Bahngruppe einen Häufigkeitsgipfel aufweist (Vgl. Diagr. 32), sind die Rückseitenkaltluftvorstöße sehr viel kräftiger entwickelt, so daß die Zyklonen mit Höhentieft besonders im März sehr tiefe Kerndrucke mit hohem Gradienten und entsprechenden Sturmstärken aufweisen. Von der Abkühlung durch die arktische Polarluft werden allerdings nur der Süden und Südosten des Gebietes stärker betroffen, während Finnland durch den Luftmassenwechsel im März noch eine Erwärmung erfährt.

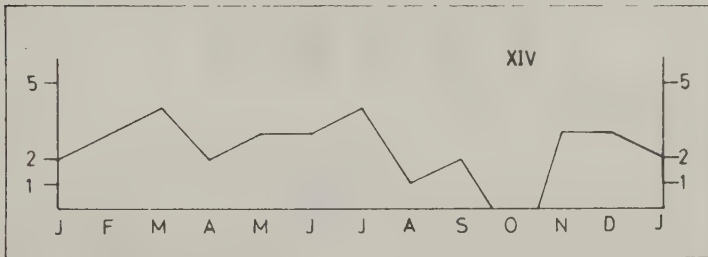


Diagramm 32 Jahresgang der Bahngruppe XIV

Auch im Sommer, in dem der Juli mit vier Fällen einen zweiten Gipfel aufweist (Vgl. Diagr. 32), erfolgen fast regelmäßig Kaltluftausbrüche auf der Rückseite, so daß sich von den acht auftretenden Zyklonen sechs über dem Ostseeraum noch vertiefen. In der kühlen Meeresluft kommt es von Norddeutschland bis zum Baltikum zu Schauerniederschlägen, die meist von Gewittern begleitet sind.

Zur Zahl der sehr intensiven Bahngruppen gehört neben Bahngruppe VI und XII auch Bahngruppe XIV. Alle drei Bahngruppen führen südlich des norwegischen Gebirges vorbei, so daß der Weg der Zyklonen meistens über freie Wasserflächen verläuft. Durch die verminderte Bodenreibung wird dabei der Auffüllungsprozeß verzögert oder sogar eine Vertiefung eingeleitet, so daß die Sturmhäufigkeit und Sturmstärke bei diesen Bahngruppen am größten ist. Auch bei Bahngruppe XIV ist die Verteilung der IF eindeutig auf die intensiveren Werte hin verschoben (Vgl. Diagr. 33, S. 154), so daß trotz der geringen Gesamtzahl verschiedene Werte noch überdurchschnittlich oft vertreten sind. Allein auf den IF 75/7 entfallen dabei vier Tiefdruckgebiete.

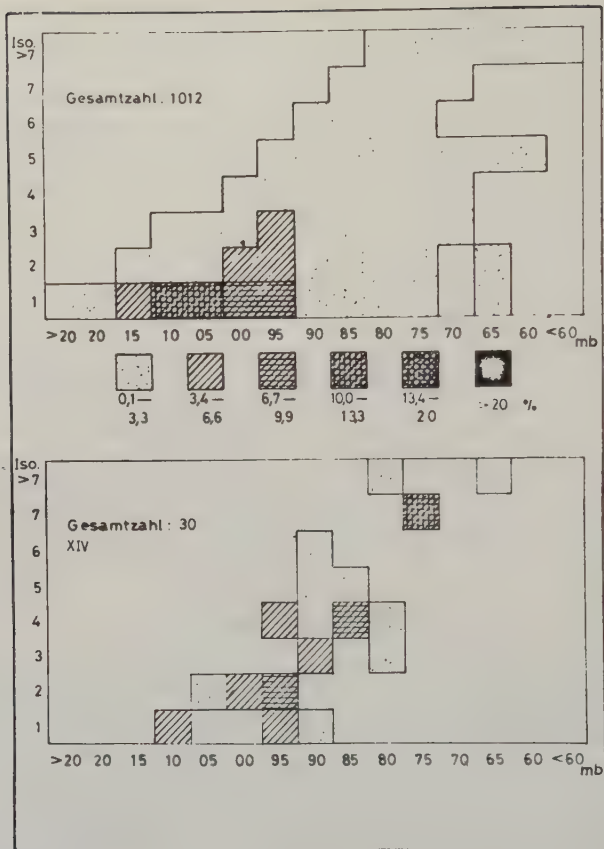


Diagramm 33 Verteilung der Intensitätsfaktoren

ac.) Bahngruppe XV

Die Richtung dieser Bahngruppe wird von den Tiefdruckgebieten verhältnismäßig selten eingeschlagen, denn mit nur 12 Fällen steht sie zahlenmäßig an vorletzter Stelle. Aus den nördlichen Teilen des Nordmeeres kommend ziehen die Zyklonen direkt nach Süden und biegen zwischen dem 55. und 60. Breitenkreis über dem Ostseeraum nach Osten um (Vgl. Abb. 74/75, S. 155). Während ebenso wie bei Bahngruppe X die reine Nordrichtung der Höhenströmung durch ein blockierendes Hoch über dem nördlichen Ostatlantik hervorgerufen wird, sind nordrussische Kaltlufttropfen die Ursache für das fast rechtwinklige Abknicken der Zugbahnen nach Osten.

Abb. 74 Bahngruppe XV

--- Frühling
— Sommer

○ Okklusionstief
□ Aszend. Zykl.
■ Deszend. Zykl.

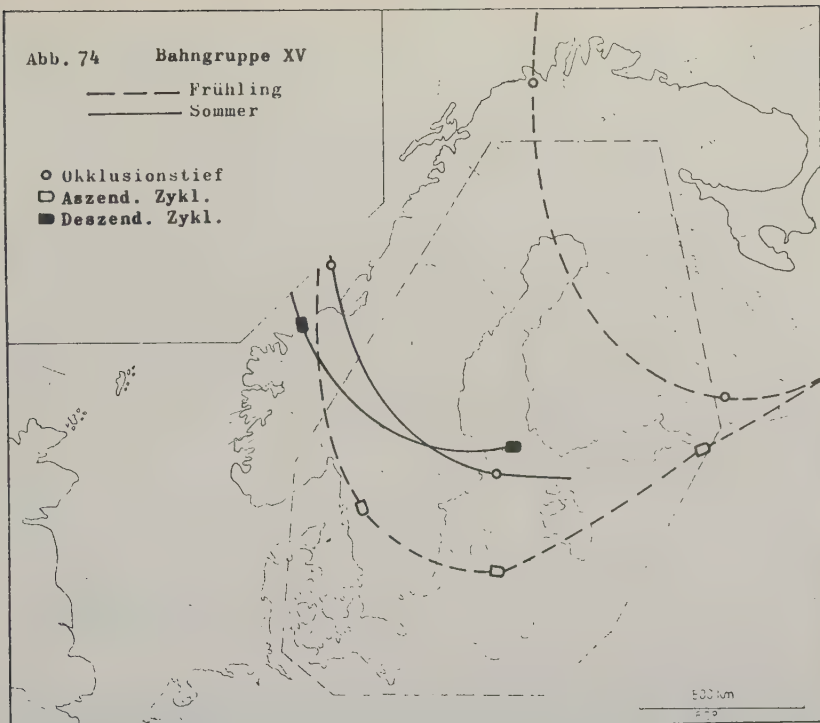
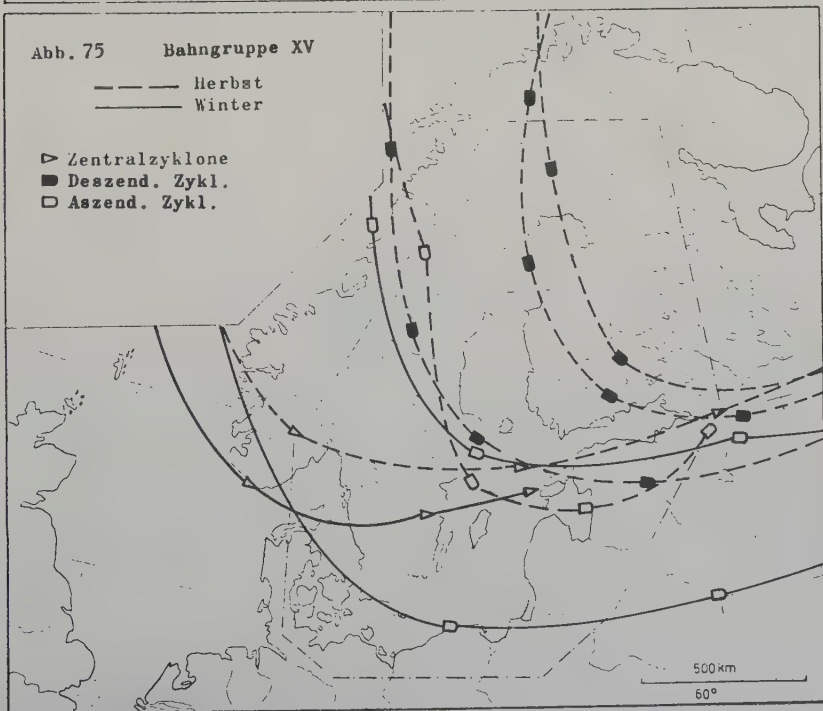


Abb. 75 Bahngruppe XV

--- Herbst
— Winter

▷ Zentralzyklone
■ Deszend. Zykl.
□ Aszend. Zykl.



Entweder verlagern sie sich von der Barentssee nach Südwesten und vereinigen sich über der Ostsee mit dem Bodentief, so daß eine Aszendierende Zyklone entsteht, die infolge stärkerer Verwirbelung dann aus ihrer Nordbahn nach links ausschert, oder der Kaltlufttropfen bleibt stationär und steuert das okkludierte Tief um sich herum. Da letzterer Fall aber nur zweimal auftritt, verschiebt sich bei dieser Bahngruppe das Verhältnis von flachen zu hohen Zyklonen zugunsten der letzteren so stark, daß die Zyklonen mit Höhentief mit 83 % ihren höchsten Anteil an einer Bahn erreichen. Allerdings darf diesem Prozentsatz wegen der geringen Anzahl der Fälle nicht zuviel Gewicht beigemessen werden. Dagegen ist bei einem Vergleich der Typenverteilung mit Bahngruppe X in den Klassen a) Zyklonen mit Höhentief und b) Rest der χ^2 -Wert von 14,37 bei einem Freiheitsgrad auf dem 0,1-Niveau signifikant. (Wegen der geringen Anzahl wurde die Verteilung von X als erwartet vorausgesetzt.) Dabei zeigt sich, daß der größere Unterschied nicht in der Typenvielfalt als vielmehr in dem höheren Anteil von hochreichenden Zyklonen begründet liegt. Dieser verursacht auch den beträchtlich unter dem Durchschnitt liegenden Geschwindigkeitskoeffizienten von 1,66.

Der Jahresgang dieser Bahngruppe ist sehr ausgeglichen und eine Häufung der Fälle im Februar und Mai, wie sie Bahngruppe X aufweist, ist nicht festzustellen (Vgl. Diagr. 34).

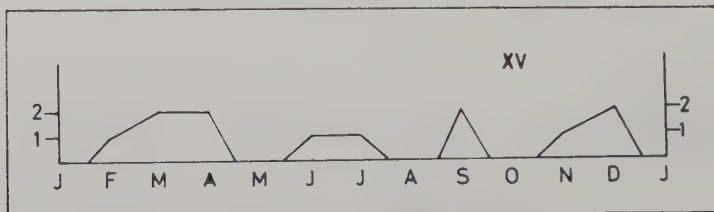


Diagramm 34 Jahresgang der Bahngruppe XV

Tabelle 22 Bahngruppe XV

Tiefdrucktypen	Frühling	Sommer	Herbst	Winter	Jahr
Okklusionstief	1	1	-	-	2
Zentralzyklone	-	-	1	1	2
Deszend. Zykl.	-	1	3	-	4
Aszend. Zykl.	1	-	1	2	4
Summe	2	2	5	3	12

Da der Warmsektor der Zyklonen fast immer außerhalb des Ostseegebietes vorbeizieht, ist es auch hier wie bei Bahngruppe X die polare Rückseitenkaltluft, von der das Untersuchungsgebiet hauptsächlich betroffen wird. Dabei handelt es sich Frühling um kontinentale Arktikluft, die von der Kola-Halbinsel her zur mittleren Ostsee gelangt und von dort über das Baltikum hinaus nach Südosten vorstößt. Im Sommer dagegen vermag sich der Ausbruch der maritimen Polarluft nicht so weit gegen die Festlandsluft durchzusetzen, so daß der Vorstoß entlang des 20. Längengrades südlich der Åland-Inseln zum Erliegen kommt. Im Herbst und Winter ist es je nach Lage der Einzelbahn sowohl maritime als auch kontinentale Arktikluft, die das Ostseegebiet beeinflusst. Dabei fallen im südlichen Ostseegebiet die Niederschläge aus abgehobener Warmluft, während es im nördlichen Teil an der schwedischen Ostküste zu topographisch bedingten Aufgleitniederschlägen kommt (Vgl. S. 82).

b. antizyklonal gekrümmt

ba.) Bahngruppe XVI

Die beiden in einem antizyklonalen Drehsinn verlaufenden Bahngruppen XVI und XVII kommen aus süd- bis südöstlichen Richtungen in den Ostseeraum und unterscheiden sich voneinander außer der Herkunftsrichtung nur hinsichtlich der Stärke ihrer Krümmung. Die Tiefdruckgebiete der Bahngruppe XVI, die aus dem südosteuropäischen Bereich kommen, ziehen anfangs nach Nordwesten und biegen über dem Ostseegebiet zwischen dem 55. und 60. Breitenkreis nach Nordosten um (Vgl. Abb. 76/77, S. 158). Sie entstehen zumeist an Kaltfronten nordskandinavischer Zyklonen, an denen es über dem Karpatenraum zur Ausbildung einer Wellenströmung kommt. Diese gelangen auf der Vorderseite eines mitteleuropäischen Trogas mit NW/SO-verlaufender Achse unter Vertiefung in den Ostseeraum. Die synoptische Lage entspricht also der, die auch für die Steuerung der Bahngruppe I bestimmend ist. Während aber die Zyklonen der Südostrichtung nur schwach entwickelt sind und fast alle innerhalb des Ostseeraumes absterben (Vgl. Abb. 31/32, S. 78), folgen bei der Bahngruppe XVI die kräftigeren Tiefs der um das blockierende Hoch herumführenden Höhenströmung und verlassen das Ostseegebiet wieder nach Nordosten.

Abb. 76 Bahngruppe XVI

--- Frühling
— Sommer

○ Okklusionstief
□ Aszend. Zykl.
▷ Zentralzyklone

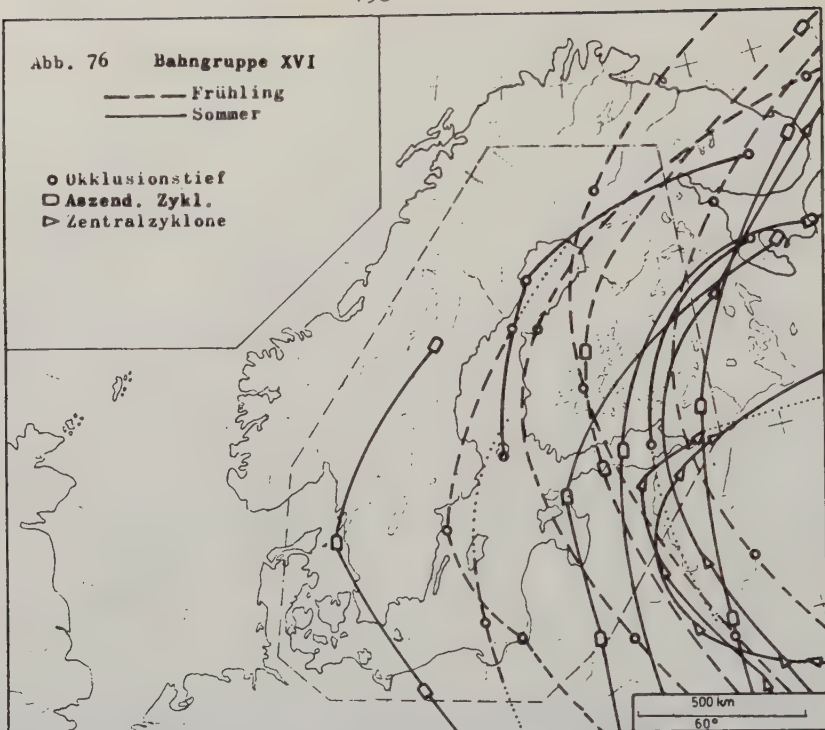


Abb. 77 Bahngruppe XVI

--- Herbst
— Winter

○ Okklusionstief
□ Aszend. Zykl.

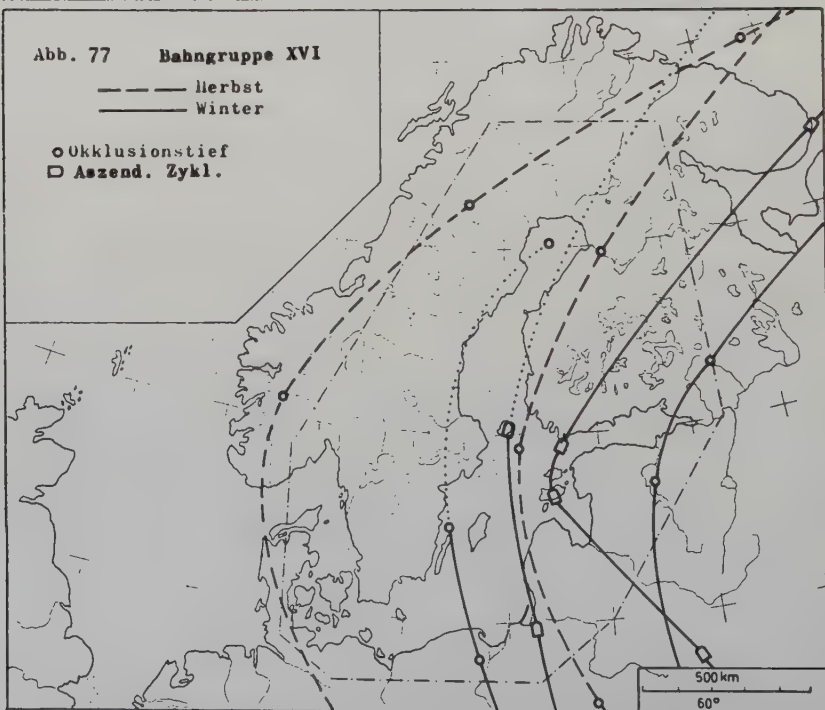


Tabelle 23 Bahngruppe XVI

Tiefdrucktypen	Frühling	Sommer	Herbst	Winter	Jahr	%
Okklusionstief	5	2	2	2	11	52,5
Zentralzyklone	-	3	-	-	3	14,5
Azsend. Zykl.	1	4	-	2	7	33,5
Summe	6	9	2	4	21	

Hinsichtlich der Jahreszeiteinteilung stimmen Bahngruppe I und XVI gut überein, denn sie haben das Sommermaximum gemeinsam. Bei Bahn XVI weist allerdings der Mai mit 6 Fällen den höchsten Monatswert auf (Vgl. Diagr. 35). In bezug auf die Typenverteilung besteht aber ein sehr großer Unterschied, denn wenn man die Verteilungshäufigkeit von Bahngruppe I zu Grunde legt und den Vergleich in den Klassen a) Okklusionstief, b) Zentralzyklone, c) Aszendierende Zyklone und d) Rest durchführt, ergibt sich ein χ^2 -Wert von 82,54, der auf dem 0,1-Niveau signifikant ist. Obwohl die Klasse d) daran einen großen Anteil hat, da von den 9 Typen bei Bahngruppe I nur noch drei bei Bahngruppe XVI auftreten, ist der unterschiedliche Anteil der Aszendierenden Zyklonen von sehr viel stärkerem Einfluß. Während bei I dieser Typ nur einmal vorkommt, besteht XVI zu einem Drittel aus Aszendierenden Zyklonen. Sie bilden sich vornehmlich im Sommer, wenn zwischen der maritimen Polarluft des Troges und der stark erhitzten Festlandsluft scharfe Temperaturkontraste entstehen, die die zur Verwirbelung notwendigen Energien liefern.

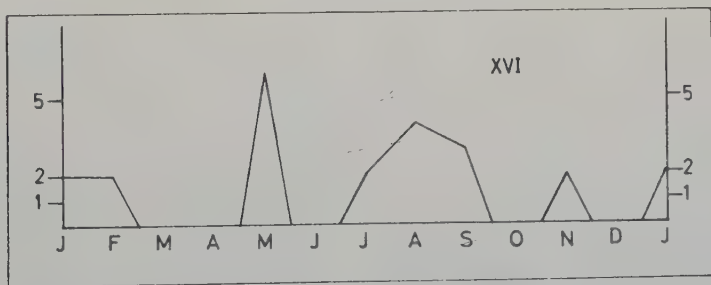


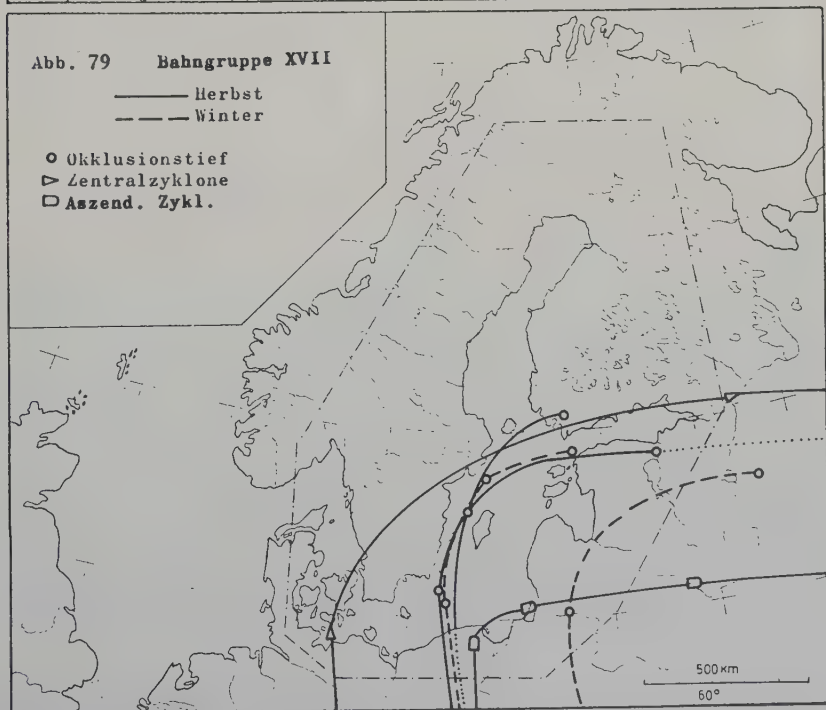
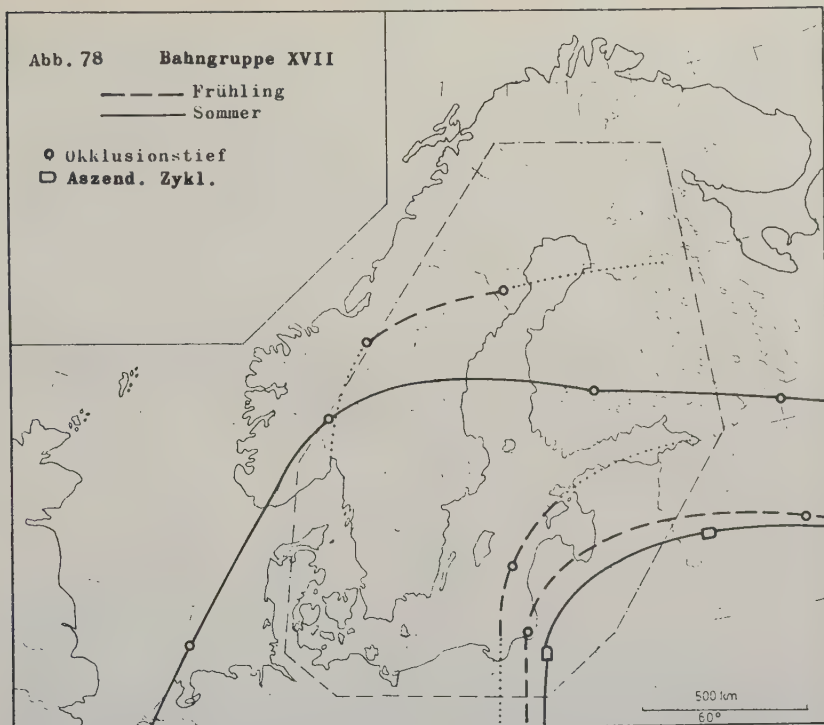
Diagramm 35 Jahresgang der Bahngruppe XVI

Da die größere Verwirbelungstendenz auch eine langsamere Wanderungsgeschwindigkeit bedingt, liegt der GK mit 1,47 sehr weit unter dem Durchschnitt.

Die Bahngruppe erreicht im Frühjahr, in dem die flachen Tiefdruckgebiete am stärksten vertreten sind, ihr Monatsmaximum. Die Zyklonen treten alle im Mai auf (Vgl. Diagr. 35, S. 159), wobei allein der Mai 1962, der fast ausschließlich von meridionalen Zirkulationsformen beherrscht wurde (Vgl. Großwetterlagen Mitteleuropas), 4 Fälle auf sich vereinigt. Von den Tiefs wird russische Warmluft nach Nordwesten gegen die polare Kaltluft des Troges geführt, so daß der ganze Untersuchungsraum östlich des 20. Längengrades von Aufgleitniederschlägen erfaßt wird, die Anfang Mai über der Bottenensee noch als Schnee fallen. Im Sommer überwiegen die hochreichenden Zyklonen, von denen drei stark verwirbelt sind (mehr als 3 geschlossene Isohypsen im 500 mb-Niveau). Auch bei ihnen kommt es zu Aufgleitniederschlägen auf der Vorderseite, während auf der Rückseite kühle Meeresluft aus NW in mehreren Staffeln gegen die südöstliche Küste geführt wird, so daß über der DDR und Polen Gewitter auftreten. Die beiden Tiefdruckgebiete im Herbst fallen in den November, wobei durch das westliche Tief, das sich über der Ostsee um 20 mb vertieft, mit einer kräftigen Südostströmung (Kaunas SO 8) mittelmeerische Warmluft in das Ostseegebiet geführt wird, aus der präfrontal verbreitet Niederschläge fallen. Auch im Winter sind die vor der Warmfront fallenden Niederschläge das dominierende Wetterelement, das von den Zyklonen dieser Bahngruppe ausgeht.

bb.) Bahngruppe XVII

An letzter Stelle der nicht gestreckten Bahngruppen steht mit nur 11 Fällen Bahngruppe XVII. Auf Grund ihrer Herkunftsrichtung ist sie sehr eng mit der zuletzt besprochenen verwandt, wegen der andersartigen Beeinflussung des nördlichen Ostseegebietes muß sie aber gesondert behandelt werden. - Die Tiefdruckgebiete ziehen aus dem mitteleuropäischen Raum genau nach Norden und biegen in der Mitte des Ostseeraumes nach Osten um (Vgl. Abb. 78/79, S. 161). Zwei Zyklonen, die, von der Masse der Zugbahnen abgesondert, über das Skagerrak nach Finnland ziehen, werden von einem antizyklonalen Druckgebilde gesteuert. Sie umrunden ein mitteleuropäisches Hoch mit einem weit nach Norden vorgeschobenen Höhenhochkeil auf dessen Nordwestseite. Die anderen Zyklonen, die sich im südöstlichen Untersuchungsgebiet konzentrieren, gelangen auf der Vorderseite eines Mitteleuropatrogas mit meridionaler Achse in den Ostseeraum.



Die synoptische Situation gleicht also derjenigen, die auch für Bahngruppe II bestimmend ist. Nur reicht bei XVII der Einfluß des blockierenden Hochs nicht so weit nach Norden wie bei II, so daß der Trog schon in Höhe des 60. Breitenkreises endet und die Höhenströmung über dem finnischen Meerbusen wieder eine west-östliche Richtung einschlägt, die zu dem scharfen Knick in den Zugbahnen führt.

Tabelle 24 Bahngruppe XVII

Tiefdrucktypen	Frühling	Sommer	Herbst	Winter	Jahr
Okklusionstief	3	1	2	2	8
Zentraluyklone	-	-	1	-	1
Aszend. Zykl.	-	1	1	-	2
Summe	3	2	4	2	11

Da die Tiefdruckgebiete allgemein die Tendenz aufweisen, bei stärkerer Verwirbelung und Vertiefung aus der einmal eingeschlagenen Bahn nach links auszuscheren, erreichte der Anteil der Zyklo-nen mit Höhentief bei der Bahngruppe XV (Nord auf West abdrehend) mit 83 % sein Maximum. In der spiegelbildlich dazu verlaufenden Bahngruppe XVII müßten sich die Verhältnisse dahingehend umkehren, daß die flachen und eine schwache Verwirbelungstendenz aufweisen-den Tiefs vorherrschend sind. Diese Erwartung wird sehr deutlich durch die Typenverteilung bestätigt, denn 3/4 aller Druckgebilde sind flache Okklusionstiefs. Die markanten Richtungsänderungen der Zugbahnen sind also hier nicht von selbststeuernden Zyklonen, son- dern allein vom Verlauf der Höhenströmung abhängig. Auch die bei- den Aszendierenden Zyklonen bilden ihr Höhentief nicht selber aus, sondern ein Kaltlufttropfen aus dem Trog vereinigt sich mit ihnen.

Vergleicht man die Zusammensetzung von XVII mit der die gleiche Herkunft aufweisenden Bahngruppe II in den Klassen a) Okklusions- ties, b) Zentralzyklone, c) Aszendierende Zyklone und d) Rest, wobei wegen der geringen Anzahl die Verteilung von II als erwartet vorausgesetzt wird, so erhält man einen χ^2 -Wert von 9,77. Er liegt bei drei Freiheitsgraden noch oberhalb des 5 % - Niveaus, so daß eine signifikante Verschiedenheit vorliegt. Obwohl die Okklusions- ties mit mehr als 72 % einen sehr viel größeren Anteil an der Verteilung besitzen als bei II, trägt nicht die Klasse a), sondern d) am meisten zum χ^2 -Wert bei. Der Unterschied liegt also nicht so sehr in der Typenverteilung als vielmehr in der Typenvielfalt

bzw. Typenarmut begründet. - Im Verlauf der Jahresgänge weisen beide Bahngruppen keine Ähnlichkeit auf, denn XVII erreicht ihr Monatsmaximum im Dezember (Vgl. Diagr. 36), während es bei II in den August fällt.

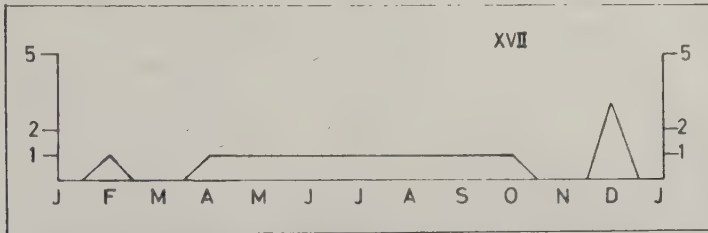


Diagramm 36 Jahresgang der Bahngruppe XVII

Der GK ist infolge der stärkeren Krümmung mit 1,36 etwas geringer als bei der zuletzt besprochenen Bahngruppe. Eine schnelle Wanderung kommt überhaupt nicht vor und eine mittlere wird nur noch von 4 Tiefdruckgebieten erreicht.

Abgesehen von den beiden von einem mitteleuropäischen Hoch gesteuerten Zyklonen, die gemäßigte maritime Polarluft in das Ostseegebiet verfrachten, reicht der Einfluß der Tiefdruckgebiete nicht so weit nach Norden wie bei Bahn XVI, so daß nur noch Südfinnland von den Niederschlägen, die aus der herangebrachten kontinentalen Tropikluft fallen, erfaßt wird, während der ganze nördliche Ostseeraum unbeeinflusst bleibt.

5. Die aberranten Bahnen

Bahngruppe XVIII

Als letzte Typen der wandernden Bodenzyklonen bleiben noch die aberranten Bahnen zu besprechen. Diese weisen einen so individuellen Verlauf auf, daß sie keiner der bisher beschriebenen Bahngruppen zuzuordnen waren, sondern zu einer gesonderten Bahngruppe zusammengefaßt werden mußten.

Die stetige Richtungsänderung, die allen diesen Zyklonen gemeinsam ist, steht immer im Zusammenhang mit einem Höhentief, das sich entweder schon beim Eintritt in das Ostseegebiet über dem Bodentief befindet oder sich später mit diesem verbindet. Flache Tiefdruckgebiete ohne Höhentief, die länger als 24 Stunden bestehen, treten bei der Bahngruppe XVIII nicht auf. Zwar gibt es flache

Tiefs, die an zwei oder drei Terminen auf unterschiedlichen Positionen zu sehen sind, aber bei der Kürze der zurückgelegten Entfernungen kann man nicht von einer Bahn sprechen. Es handelt sich dabei vielmehr um geringfügige Schwerpunktverlagerungen, so daß diese Tiefs zu den Lagetypen gerechnet wurden. - Obwohl man bei den hochreichenden Wirbeln gerade dann eine Kreissteuerung erwarten würde, wenn sie sich quasi an Ort und Stelle auffüllen, tritt dieser Fall nur viermal ein. Boden- und Höhentief umkreisen sich dann unter steter Annäherung, bis die Zyklonenachse senkrecht steht und das Tief abstirbt. Genau so häufig ist aber auch der Fall, daß sich Tiefdruckgebiete innerhalb des Ostseeraumes noch vertiefen, wobei die Druckänderung allerdings 10 mb nicht überschreitet, und einmal findet sogar eine Zyklogenese innerhalb des Ostseeraumes statt.

Tabelle 25 Bahngruppe XVIII

Tiefdrucktypen	Frühling	Sommer	Herbst	Winter	Jahr
Zentralzyklone	-	1	1	-	2
Azsend. Zykl.	1	3	2	3	9
Summe	1	4	3	3	11

Wie aus der Tabelle hervorgeht, treten aberrante Bahnen im Ostseeraum relativ selten auf (einmal pro Jahr). Möglicherweise handelt es sich hierbei um eine Erscheinungsform, die mehr für das europäische Festland typisch ist, denn G.BAHRENBURG (1968) konnte für den gleichen Untersuchungszeitraum in Mitteleuropa 58 Fälle feststellen. Diese Annahme würde noch durch die Tatsache bestätigt, daß fast alle aberranten Zugbahnen südlich des 60. Breitenkreises auftreten. Bei der Bahngruppe XVIII würde es sich dann um die nördlichsten Randerscheinungen eines typisch mitteleuropäischen Phänomens handeln.

Da bei den aberranten Bahnen nur noch zwei Tiefdrucktypen auftreten, unterscheiden sie sich signifikant von allen anderen Bahngruppen. Auch in bezug auf die Geschwindigkeit nehmen sie eine Sonderstellung ein, denn wegen der Verankerung in der Höhe ist der GK mit 1,17 von allen Bahngruppen der geringste. Er entspricht ziemlich genau dem von G.BAHRENBURG (1968) für seine "wirren Bahnen" ermittelten Wert von 1,19, was die weiter oben aufgestellte Hypothese stützen würde. Eine mittlere Geschwindigkeit wird nur noch von zwei Zyklonen erreicht, während der Rest langsam wandert.

Zyklonen mit aberranter Bahn treten ebenso wie in Mitteleuropa auch im Ostseegebiet das ganze Jahr über auf, so daß die Kurve sehr ausgeglichen ist und nur zwischen 0 und 2 schwankt (Vgl. Diagr. 37).

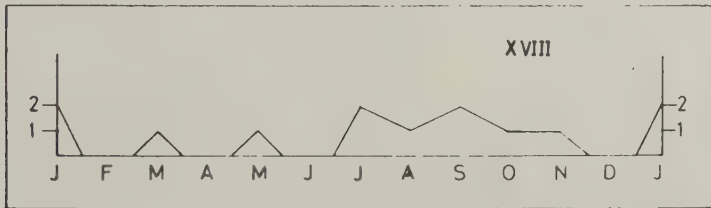
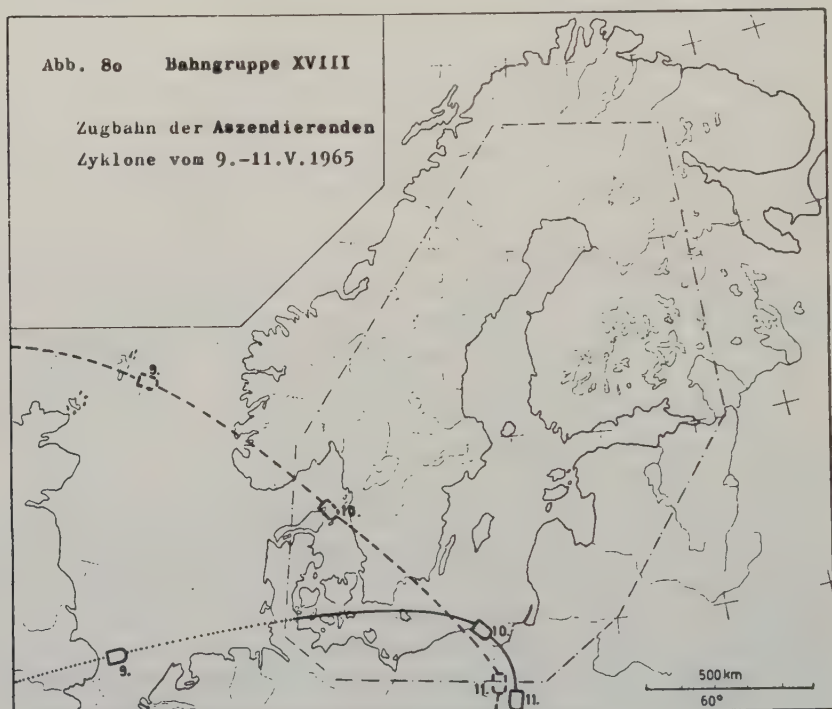


Diagramm 37 / Jahresgang der Bahngruppe XVIII

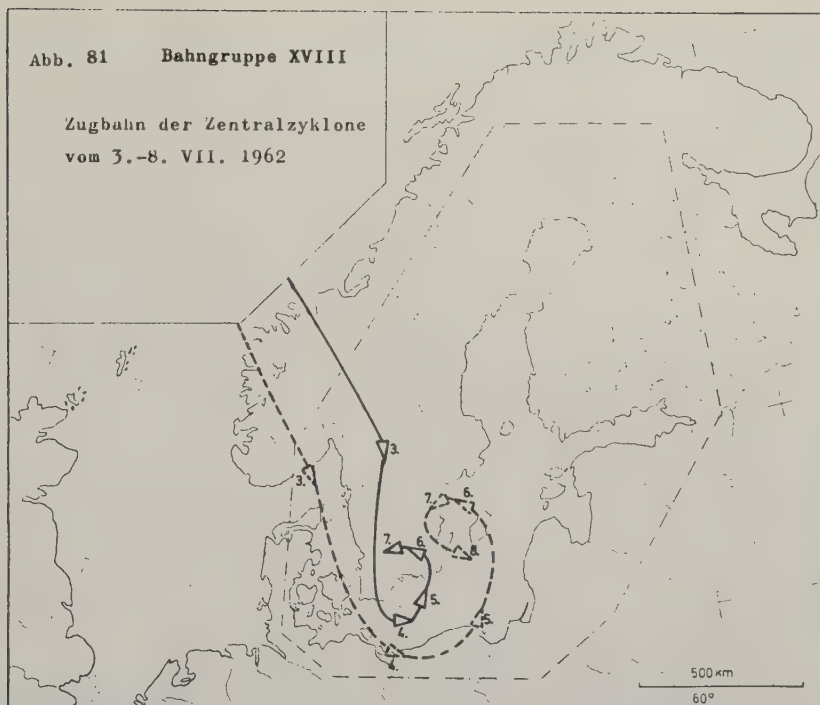
Da einerseits die Einzelbahnen sehr unterschiedlich verlaufen, andererseits die Gesamtzahl aber nicht zu groß ist, soll im Folgenden eine kurze Beschreibung jeder einzelnen Bahn gegeben werden, wobei in der Reihenfolge des jahreszeitlichen Auftretens verfahren wird. In den folgenden Abbildungen bezeichnen die gestrichelten Linien und Symbole den Weg bzw. den Standort des Höhentiefs um 0 Uhr, während das Bodentief durch durchgezogene Linien dargestellt ist.

Im Frühling, in dem nur ein Fall auftritt, verläuft die Zugbahn in antizyklonaler Drehrichtung (Vgl. Abb. 8o, S. 166). Während sich ein atlantisches Zentraltief unter Auffüllung zur norwegischen Küste verlagert, entsteht an seiner Kaltfront über Südirland eine Kaltfrontwelle, die sich am Morgen des 9. Mai ohne geschlossene Isobare über dem Ausgang des Ärmelkanals befindet. Erst beim Einlaufen in das Delta der Frontalzone, das über Schleswig-Holstein liegt, beginnt sich die Randstörung zu vertiefen. Dabei kommt es in Norddeutschland bei zum Teil stürmischen Winden zu Regenschauern, die örtlich mit Gewittern verbunden sind. Nachdem sich die Zyklone über der Ostsee um 10 mb vertieft hat, liegt sie am 10. Mai über der Weichselmündung. Der Höhentiefkern der Zyklone, die sich vor Norwegen aufgefüllt hatte, wird in den Strömungsbereich des Ostseetiefs mit einbezogen, so daß sich bei noch schief liegender Achse ein Sturmwirbel ausbildet, der mit seiner Rückseitenkaltluft über den deutschen Küstengebieten Orkanböen verursacht. Durch den Aufbau eines kräftigen Hochkeils über den britischen Inseln verstärken sich die Druck- und Temperatur-

gegensätze an der Westseite des Tiefs beträchtlich, so daß es im Verlauf des 10. eine scharfe Richtungsänderung vollführt und mit der stärksten Strömung an seiner Westseite nach Süden zieht. Nachdem sich die Achse am 11. Mai über Polen aufgerichtet hat, beginnt sich das Tief aufzufüllen und stirbt im Verlauf des nächsten Tages ab.

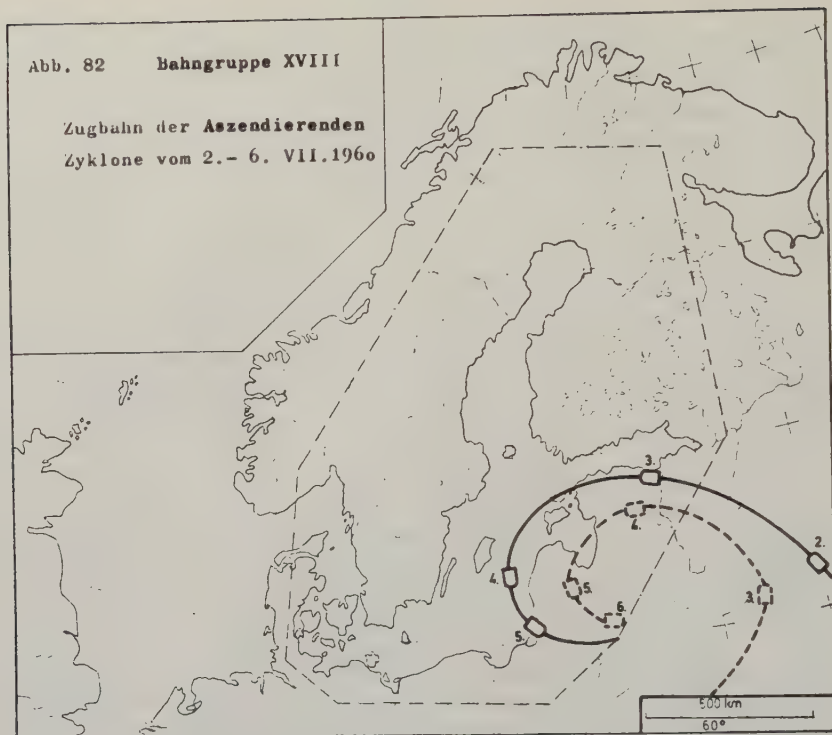


Obwohl im Sommer die aberranten Bahnen mit 4 Fällen ihre größte Häufigkeit erreichen, lassen sich irgendwelche Gemeinsamkeiten in der Entwicklung der Zyklonen nicht feststellen. - Am 3. Juli verlagert sich ein Zentraltief vom Nordmeer nach Schweden, wobei es durch eine von Schottland auflaufende Randstörung neue Energien erhält und sich um 10 mb vertieft (Vgl. Abb. 81, S. 167). Durch die verstärkte Verwirbelung dringt die arktische Polarluft an seiner Südseite mit stärkeren Winden bis zum Baltikum vor, so daß es im ganzen südlichen Ostseeraum zu Schauerniederschlägen kommt. Während sich die Zyklone an der Ostflanke eines atlantischen Hochs weiter nach Südosten bewegt und am 4. über der Odermündung



dung liegt, beginnt sich das Bodentief aufzufüllen. Mit genau senkrechter Achse erreicht die Zyklone in der Höhe dagegen mit 7 geschlossenen Isobaren ihre stärkste Intensität. Der Höhenwirbel, der zum bestimmenden steuernden Druckgebilde in Europa geworden ist, erstreckt sich in diesem Stadium von Oberitalien bis zum Nordkap. Damit ist der Höhepunkt der Entwicklung überschritten und die Zyklone beginnt sich aufzufüllen. Als frontenloses Kaltes Tief verharret der Wirbel quasistationär über Südschweden, wobei die Auffüllung am Boden rascher fortschreitet als in der Höhe, so daß am 8. Juli nur noch ein Kaltlufttropfen über Gotland zurückbleibt. Während des ganzen Auffüllungsprozesses kommt es in der Nähe des Kerns zu vereinzelten Gewittern und Schauern.

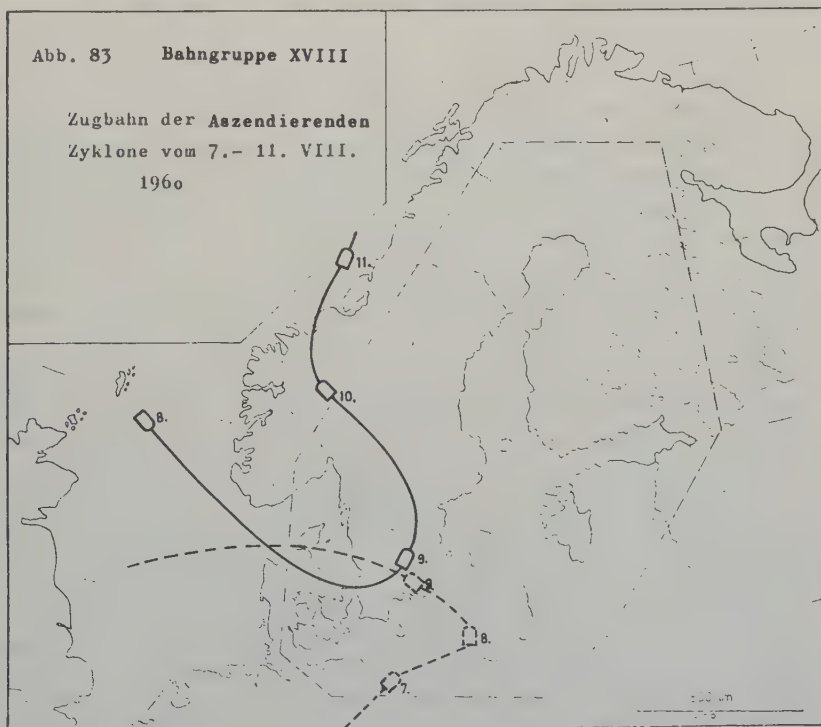
Auch bei dem zweiten Fall im Juli handelt es sich um ein Tief, das unter Verwirbelung im Ostseeraum abstirbt. An der Kaltfront eines sich auffüllenden schwedischen Zentraltiefs bildet sich am 2. Juli über Weißrußland eine Wellenstörung, die auf der Vorderseite eines zonalen Trogas nach Nordwesten gesteuert wird (Vgl. Abb. 82, S. 168). Während das schwedische Zentraltief abstirbt



und sich als Kaltlufttropfen in die südliche Ostsee verlagert, wird auf seiner Vorderseite ein polnischer Kaltlufttropfen nach Nordosten gesteuert, so daß am 3. über dem Peipussee ein neues hochreichendes Tief entsteht, dessen Achse noch nach Südosten geneigt ist. Durch den erhaltenen Impuls beginnt das Bodentief stärker zu verwirbeln, wobei auf seiner Nordseite russische Warmluft nach Südwesten gegen die Flanke des Troges geführt wird, so daß die mittlere Ostsee und Estland von Aufgleitniederschlägen erfaßt werden. Während die Zyklone ihre Drehbewegung fortsetzt und sich am 4. Juli zur lettischen Küste bewegt, setzt sich die Warmluft weiter nach Südwesten durch und drängt den ehemaligen schwedischen Kaltlufttropfen nach Ostpolen ab. Gleichzeitig nähert sich der ehemalige polnische Kaltlufttropfen dem Bodentief, so daß sich die Achse aufzurichten beginnt. Auf der Westseite der Zyklone strömt jetzt vor der Warmfront kühle Meeresluft über Skandinavien südwärts, in der sich ein Niederschlagsgebiet von Südschweden bis zu den Karpaten ausbreitet. Am nächsten Tag verlagert

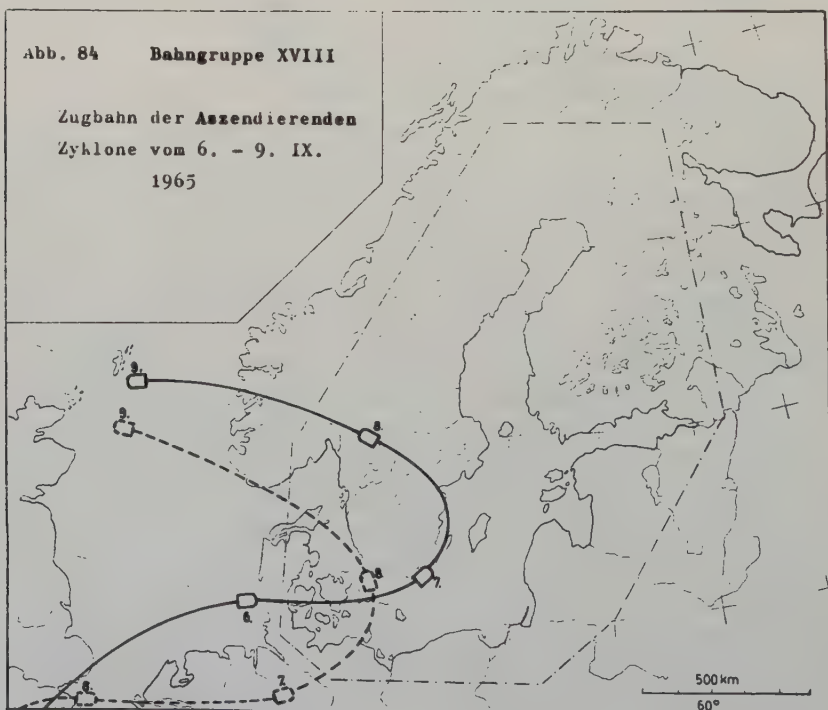
sich die Zyklone nur noch wenig. Boden- und Höhentief liegen jetzt über Litauen fast senkrecht übereinander und der Auffüllungsprozeß beginnt. Während das Frontensystem unter Ausbildung einer Randstörung nach Nordwesten abzieht, stirbt die Zyklone am Boden ab. Der zurückgebliebene Kaltlufttropfen bewegt sich noch etwas nach Osten, verliert dabei aber immer mehr an Intensität und löst sich am nächsten Tag ganz auf.

Während bei den bisher besprochenen Bahnen die Auffüllung von unten nach oben erfolgte, so daß das Bodentief immer früher abstarb als das Höhentief, verläuft die Entwicklung der Aszendierenden Zyklone vom August 1960 umgekehrt. An der Kaltfront eines nordskandinavischen Tiefs bildet sich am 8. in der Nähe der Shetland-Inseln ein Kaltfrontttief, das sich bei nur schwachen Druckgegensätzen nach Südosten bewegt, wobei der gradlinige Verlauf der Front nur wenig deformiert wird (Vgl. Abb. 83). Auch am 9., als sich das Druckgebilde mit dem Höhentief einer alten Ostseezyklone



zu einem hochreichenden Tief verbindet, nimmt die Verwirbelungstendenz nicht wesentlich zu, so daß sich eine gradlinige Front entlang des 15. Längengrades von Lappland bis zur Odermündung hinzieht. In der Nähe des Kerns fallen über Südschweden geringe Niederschläge. Im Verlauf des Tages erfolgt aus einem Kaltlufttropfen über den Britischen Inseln ein Kaltluftvorstoß nach Osten, der die Kaltfront nach Nordosten bis zu den Ålandinseln vorschiebt, so daß die Zyklone anfängt zu verwirbeln. Während sich das Höhentief vom Bodentief trennt und in dem britischen Kaltlufttropfen aufgeht, wird das Bodentief an seiner Nordostflanke am 10. Juli nach Norwegen gesteuert, wo es zu okkludieren beginnt. Bis zum 11. erfolgt dann eine abermalige Richtungsänderung, denn das Tief folgt jetzt der Höhenströmung, die zwischen dem britischen Tief und einem blockierenden russischen Hoch nach Norden gerichtet ist.

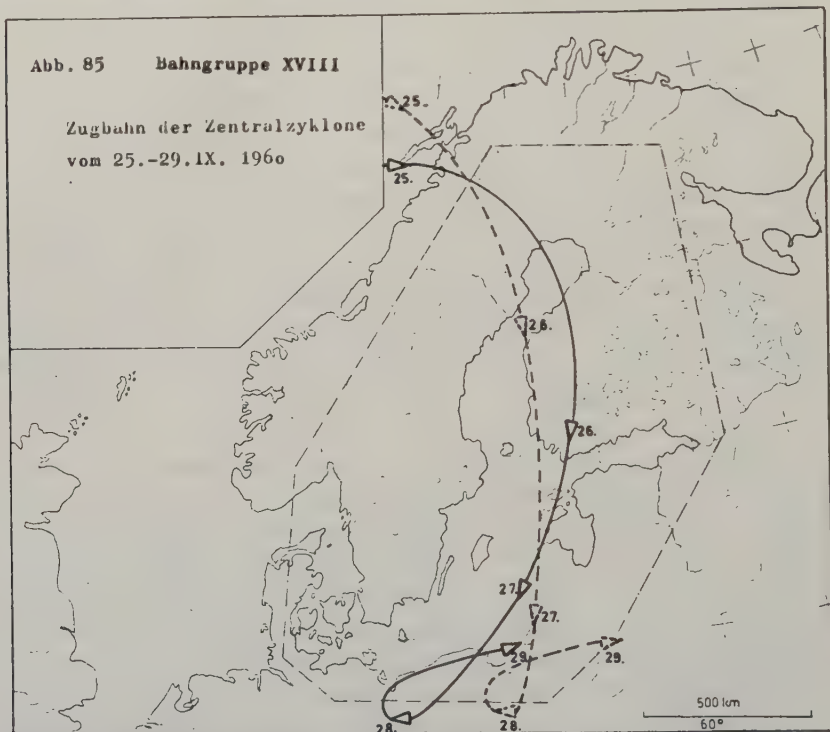
Die letzte Entwicklung des Sommers erfolgt vom 6. - 9. September, als sich ein Kaltlufttropfen von der Bretagne zum Ausgang des Ärmelkanals verlagert und sich dabei bis zum Boden durchsetzt (Vgl. Abb. 84).



Hinter der vorderen Begrenzung der Kaltluft, die bis zur Linie Lübeck-Berlin vorgedrungen ist, kommt es in Norddeutschland zu postfrontalen Niederschlägen und stärkerer Abkühlung. Das unbeständige Wetter hält in Norddeutschland auch noch am nächsten Tag an, als sich die Zyklone unter leichter Vertiefung weiter nach Nordosten verlagert. Durch eine von Frankreich heranziehende Randstörung, die sich mit dem Kern vereinigt, erhält die Zyklone einen neuen Impuls, so daß sie sich in der Höhe und am Boden vertieft. Da gleichzeitig ein russischer Hochkeil über Lappland nach Nordwesten vorstößt, nimmt die Höhenströmung infolge des verschärften Druck- und Temperaturgegensatzes auf der Nordostseite der Zyklone zu, so daß diese nach Nordwesten einschwenkt und am 8. über Mittelschweden liegt. In der abgehobenen russischen Warmluft zieht sich ein Niederschlagsgebiet von Norwegen bis nach Finnland, während sich der Wolkenschirm bis zum Nordkap erstreckt. Unter Beibehaltung seiner nach Westen gerichteten Verlagerungsrichtung bewegt sich das Tief am 9. zu den Shetland-Inseln, wo es sich mit einem britischen Tief zu einem neuen großen Steuerungszentrum vereinigt.

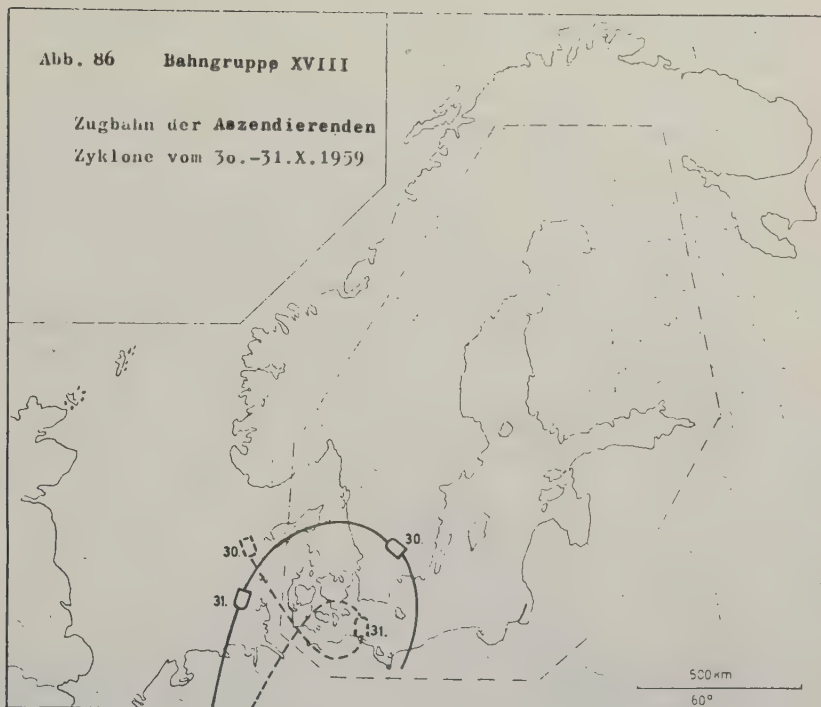
Die zweite Zentralzyklone, die auch vom Nordmeer in den Ostseeraum zieht und hier abstirbt, fällt in den Herbst. Sie bewegt sich auf antizyklonal gekrümmter Bahn von den Färöern nach Nordosten und erreicht am 25. September die Lofot-Inseln (Vgl. Abb. 85, S. 172). Verstärkt durch einen nachfolgenden Zwischenhochkeil strömt auf ihrer Südseite arktische Polarluft nach Südosten, die in den höheren Lagen Norwegens die Temperaturen stark zurückgehen läßt. Da sich die atlantische Hochzelle kräftig nach Norden ausweitert, wird das Tief am 26. auf ihrer Ostseite nach Südfinnland gesteuert. Sein weit nach Südosten ausgreifendes Druckfallgebiet baut eine osteuropäische Hochdruckzone ab, so daß die Kaltfront bis nach Süddeutschland vorankommt. In der über Skandinavien nach Süden strömenden Polarluft kommt es über der DDR und Polen zu kräftigen Schauern. Während das Nordmeerroch am 27. seinen Schwerpunkt vor die norwegische Küste verlagert, zieht die hochreichende Zyklone an seiner Ostflanke weiter nach Süden. Von Osten wird jetzt über das Baltikum russische Warmluft eingewirbelt, die beim Aufgleiten auf die arktische Polarluft zu verbreiteten Niederschlägen über der mittleren Ostsee führt. Am 28. hat das kräftige Nordmeerroch seine Lage fast unverändert beibehalten. An seiner Südostflanke schwenkt das Tief nach Südwesten ein. Obwohl sich das Boden-

tief aufzufüllen beginnt, ist am 28. noch ein kleiner Kern über der Odermündung zu erkennen, der über dem nördlichen Mitteldeutschland örtlich starke Regenfälle verursacht und seinen Wolkenschirm bis zur Elbe ausdehnt. Im Verlauf des 28. kommt auf der Ostseite des Hochs ein Kaltluftausbruch in Gang. In der von der



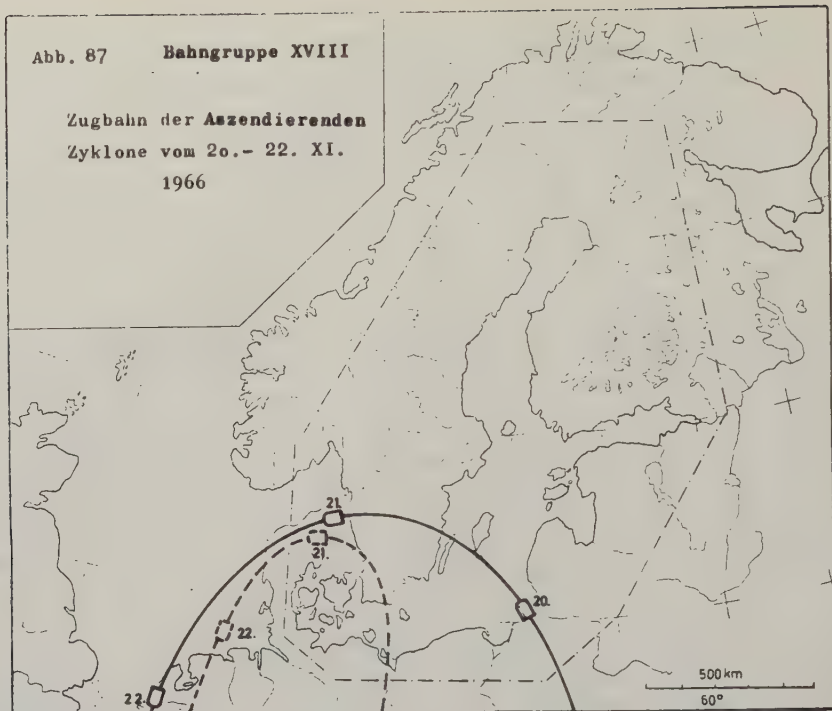
Kolahalbinsel nach Südwesten vorstoßenden Kaltluftzunge schnürt sich am 29. über Finnland ein Kaltlufttropfen ab, der jetzt die Bewegung der Ostseezyklone bestimmt, indem er sie bei seiner weiteren Südwestverlagerung nach Osten abdrängt, wo sie am 29. über Litauen abstirbt.

Im Herbst findet auch die einzige Zyklogenese der aberranten Bahnen im Ostseeraum statt. Auf der Vorderseite eines mitteleuropäischen Trogos verläuft die Kaltfront einer Spitzbergenzyklone genau strömungsparallel von Nord nach Süd. An ihr bildet sich am 30. über der Odermündung eine Wellenstörung, die schnell verwirbelt und nach Südschweden gesteuert wird (Vgl. Abb. 86, S. 173). Durch einen kräftigen Warmluftstrom auf der Vorderseite einer



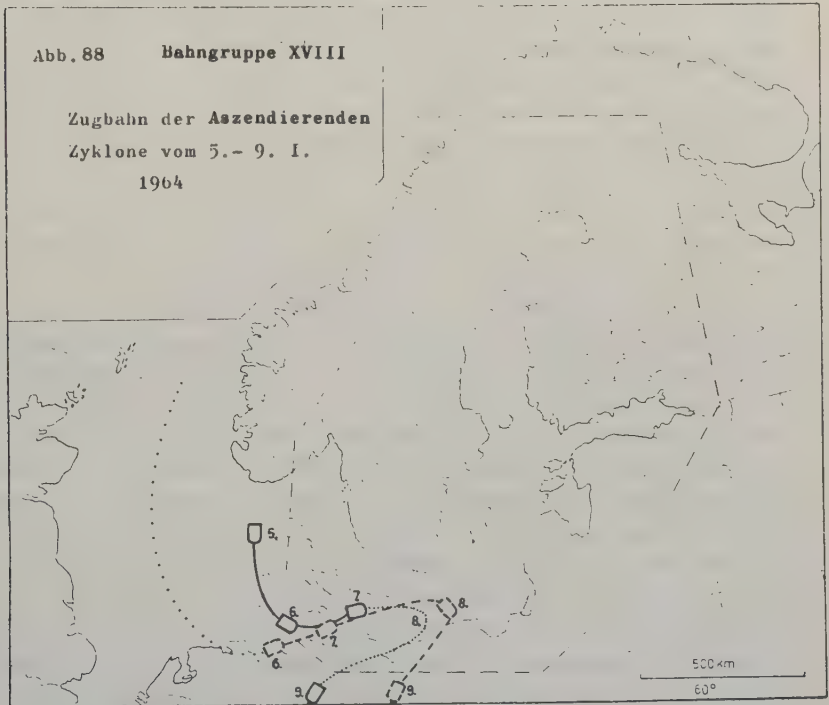
atlantischen Zyklone wird der Höhentrog über dem Nordmeer aufgefüllt, so daß sich in ihm vor der dänischen Küste ein Kaltlufttropfen abschnürt, der am 31. zur pommerschen Küste wandert und das Bodentief kreisförmig um sich herumsteuert. Während die Kaltluft aus dem Trog bis nach Estland vordringt und im südlichen Ostseeraum die Temperaturen zurückgehen läßt, erfolgt auf der Südseite des Bodentiefs, das am 31. in der deutschen Bucht liegt, ein Zustrom milder Meeresluft nach Norddeutschland, in der es beim Aufgleiten auf die vorgelagerte Kaltluft zu starken Regenfällen kommt. Durch die Bildung einer zonalen Hochdruckbrücke zwischen einem atlantischen und einem russischen Hoch wird die Zyklone am 1. November nach Süden abgedrängt.

Einen ähnlichen Weg schlägt die Aszendierende Zyklone vom November 1966 ein, die an der Ostflanke eines Zentraltiefs über dem Golf von Genua nach Norden zieht und am 20. die Memelmündung erreicht (Vgl. Abb. 87, S. 174). Die Warmluft aus dem Schwarzmeerraum, die auf der Vorderseite nach Westen verfrachtet wird,



führt beim Aufgleiten auf die mitteleuropäische Kaltluft zu zeitweisen Niederschlägen, die teils als Regen, teils als Schnee fallen. Während sich der Höhentiefkern von den Alpen nach Norden verlagert, wird auf seiner Nordseite das Bodentief kreisförmig ins Kattegatt gesteuert, wo durch die Vereinigung beider Kerne ein neues Zentraltief entsteht, das als steuerndes Druckgebilde die Witterung in ganz Nord- und Mitteleuropa bestimmt. Das präfrontale Niederschlagsgebiet zieht an der Ostseite des Tiefs weiter nach Norden. Dabei kommt es aber nur über dem skandinavischen Kaltluftblock zu Schneefällen, während die Niederschläge weiter ostwärts in flüssiger Form fallen. Da am 22. ein atlantisches Hoch einen Keil bis nach Mittelnorwegen schiebt, erreicht die Höhenströmung auf der Westseite der bis in 100 mb-Fläche nachweisbaren Zyklone die größten Geschwindigkeiten, so daß sich das Tief jetzt nach Süden bewegt. Innerhalb des Kerns der jetzt frontenlosen Zyklone kommt es durch Hebungsvorgänge zu anhaltenden Regenfällen, die auch noch das Ostseegebiet berühren.

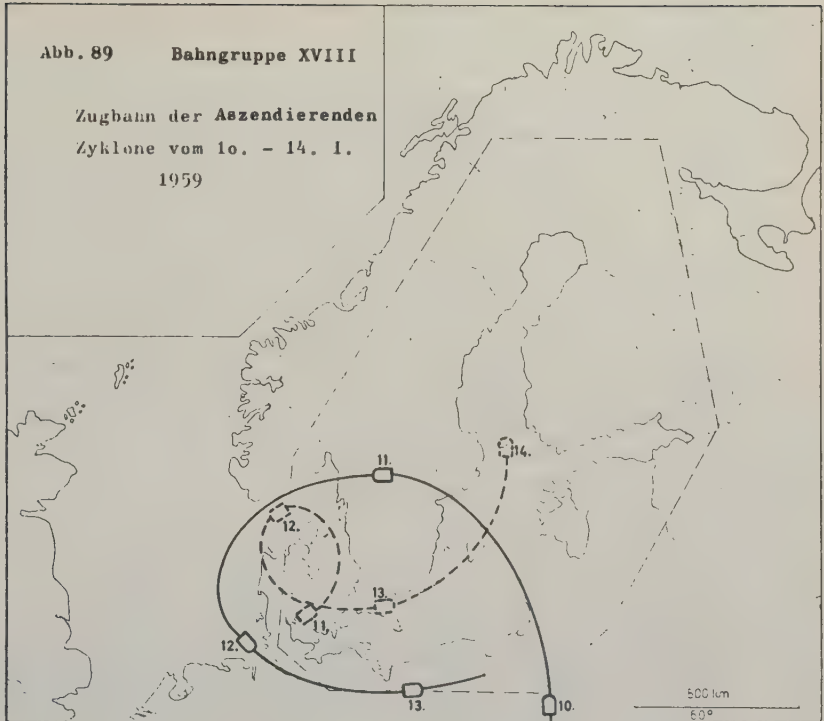
Das erste Tief im Winter, das eine aberrante Bahn einschlägt, ist von G.ROEDIGER (1964) beschrieben worden. Es stellt insofern eine bemerkenswerte Erscheinung dar, als es 10 Tage lang unter ständiger Richtungsänderung inmitten hohen Drucks durch Mittel- und Westeuropa wandert. Für uns sind nur die ersten fünf Tage von Interesse, während der sich das Tief noch im Ostseeraum bewegt. - An der schleifenden Front eines bis zur Kara-See vorangekommenen Tiefs bildet sich am 5. über der Nordsee eine Wellenstörung (Vgl. Abb. 88). Angeregt wurde diese Wirbelbildung wahrscheinlich



durch eine Kaltluftzunge, die sich von Norwegen nach England erstreckte und in der sich im Laufe des Tages ein sehr kräftiger Kaltlufttropfen abschnürt, der sich am 6. genau über dem Bodentief in Schleswig-Holstein legt. An der Südseite des Tiefs dringt in der Höhe arktische Polarluft nach Osten vor, während in den unteren Schichten ein Zustrom milder Meeresluft erfolgt. Die dabei auftretenden Regen- und Sprühregenfälle verursachen auf den

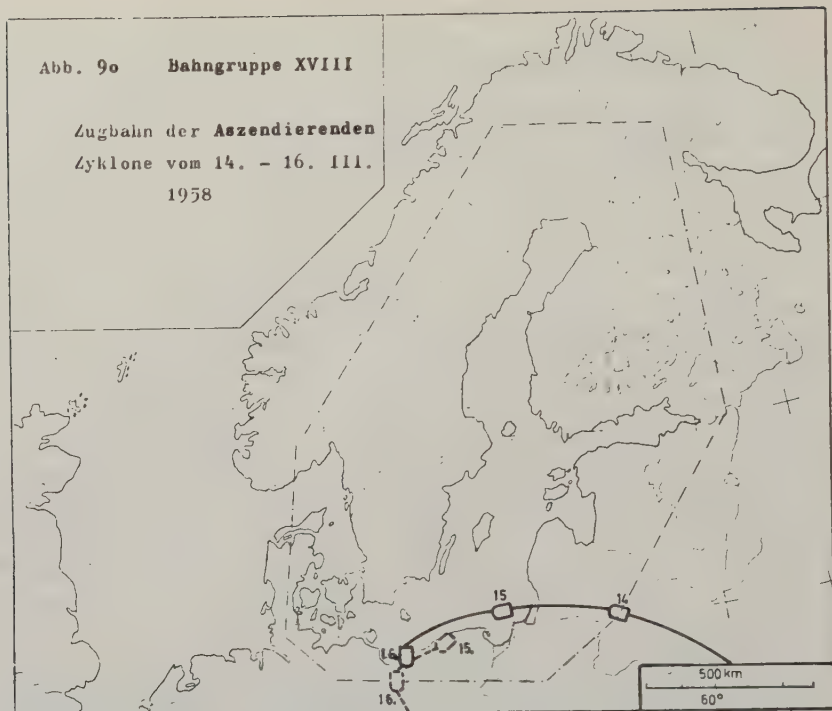
frostkalten Straßen Norddeutschlands verbreitet Glatteis. Während sich das Bodentief auffüllt und nur noch als ein winziger Kern zu erkennen ist, verlagert sich das Höhentief unter Beibehaltung seines Kerndrucks bis zum 8. nach Osten. "Für diese Verlagerung dürfte die schwache Bodenströmung an der Nordseite der über Süddeutschland liegenden Hochdruckbrücke mehr maßgebend gewesen sein als die nahezu kreissymmetrische Strömung um das Höhentief" (Tägl. Wetterber. v. 8. Jan. 1964). Am Morgen des 8. haben sich die Verhältnisse im Höhentief aber schon verändert, denn einem abgeschwächten Gradienten auf der Ostflanke steht ein verstärkter Gradient auf der Westflanke gegenüber. Ausgelöst wurde diese Asymmetrie im Windfeld durch einen Warmluftstrom auf der Vorderseite einer Nordmeerzyklone. Entsprechend der kräftigsten Höhenströmung auf seiner Westseite verlagert sich der Kaltlufttropfen jetzt nach Südwesten und stößt in die mitteleuropäische Hochdruckzone hinein, die dadurch in zwei Kerne gespalten wird. Im Bereich des Bodenkerns, der sich inzwischen wieder gebildet hat, kommt es zu heftigen Schneefällen, die aber das Ostseegebiet nicht mehr berühren.

Ebenso wie bei den beiden Zyklonen des Herbstes besteht auch beim nächsten Tief eine Vb-artige Ausgangslage. An der Ostseite eines meridionalen Troges, dessen Achse genau auf dem 10. Längengrad liegt, zieht eine Wellenstörung vom nördlichen Mittelmeer nach Polen und erreicht am 10. Januar Warschau (Vgl. Abb. 89, S. 177). Durch das Vordringen der mitteleuropäischen Kaltluft gegen die über Westrußland nach Norden strömende Warmluft wird der Temperaturgegensatz so verschärft, daß das Tief auf seinem Weg zum Vänersee wesentlich an Energie gewinnt. Infolgedessen intensiviert sich die Warmluftadvektion an seiner Nordseite, so daß über Fennoskandien hochreichende Erwärmung eintritt, die auch am Boden die Temperaturen ansteigen läßt und mit verbreiteten Schneefällen das ganze Ostseegebiet nördlich des Tiefkerns erfaßt. Da der meridionale Trog gleichzeitig auch von Westen durch ein Erwärmungsgebiet eingeengt wird, schnürt sich über der Insel Fünen ein Kaltlufttropfen ab, der die Steuerung übernimmt, so daß sich das Bodentief am 12. in die Deutsche Bucht verlagert. Die bisher auf der Südseite der Zyklone anhaltende Kaltluftzufuhr wird langsam unterbunden, da Warmluft von Skandinavien zu den Shetland-Inseln strömt. Als hochreichendes frontenloses Kaltes Tief bewegt sich die Zyklone am 13. zur Odermündung. Bei ihrem Durchzug erhöht sich



im norddeutschen Flachland die Schneedecke bei Temperaturen um 0° z.T. bis auf 30 cm. Während sich das Bodentief unter Auffüllung noch etwas nach Osten bewegt, vereinigt sich das Höhentief am 14. über den Ålandinseln mit einer neuen hochreichenden Zyklone, die von dem Ostseetief aus Weißrußland nach Nordwesten gesteuert wurde.

Auch das letzte Tief, das von allen aberranten Bahnen die geringste Krümmung aufweist, entsteht auf der Vorderseite eines Osteuropatrogens. Durch ein von Frankreich kommendes troposphärisches Erwärmungsgebiet wird ein über dem westlichen Balkan gelegener Kaltlufttropfen nach Osten abgedrängt. Durch seine Kaltluft aktiviert sich ein von der Ukraine nach Norden ziehendes Tief. Während hinter der Warmfront dieses Tiefs, das am 14. über Kaunas liegt (Vgl. Abb. 90, S. 178), die Temperaturen in Estland und Finnland kräftig ansteigen, kommt es entlang des 20. Längengrades von Lappland bis zur Weichselmündung zu präfrontalen Aufgleit-schneefällen. Durch die Warmluftadvektion nach Skandinavien wird



die anhaltende Nordströmung unterbunden, so daß sich im Trog über der Odermündung ein Kaltlufttropfen abschnürt, der das Bodentief am 15. nach Westen steuert und sich mit ihm vereinigt. Die so entstandene hochreichende Zyklone löst sich am 16. durch überlagernden Druckanstieg am Boden auf, während sie sich in der Höhe noch intensiviert. Durch einen alten Kaltlufttropfen, der von der Ukraine nach Norden gezogen war und am 17. nach Westen einschwenkt, wird die Kreissteuerung des Ostseetiefs fortgesetzt, indem es sich von der Odermündung zum Balkan bewegt.

Von den 11 besprochenen Zyklonen kann man nur die zweite (Abb. 81, S. 167), die auch in der Höhe die größte Ausdehnung aufweist, als wirklich selbststeuerndes Druckgebilde bezeichnen, während die Richtungsänderungen der restlichen Tiefdruckgebiete alle äußeren Einflüssen unterliegen. Dabei sind es viermal die Vorstöße von Höhenhochkeilen, die eine Windfeldasymmetrie und damit eine Richtungsänderung bewirken, während sechsmal eine gegenseitige Beeinflussung von zwei Höhentiefs die Kreissteuerung bedingt.

Da sich die Tiefdruckgebiete vorwiegend im südlichen Ostseeraum und in einem zyklonalen Drehsinn bewegen, kann man zusammenfassend sagen, daß das Gebiet von den Zyklonen hauptsächlich durch Erwärmung und Aufgleitniederschläge bedingende südosteuropäische Luftmassen beeinflusst wird, wobei diese Beeinflussung durch die besonders geringen Verlagerungsgeschwindigkeiten noch intensiviert wird.

6. Die Neubildungsgebiete

Um festzustellen, in wie weit das Ostseegebiet als Ganzes einen zyklagenetischen oder zyklolytischen Einfluß auf die Tiefdruckgebiete ausübt, werden in den folgenden Kapiteln die Entstehungs- und Auffüllungsgebiete, die ja schon aus den Bahnkarten zu entnehmen waren, einer genaueren Analyse unterzogen. Eigentlich müßten in die Untersuchung auch die stationären Bodenzyklogen mit einbezogen werden, da sie in stärkstem Maß vom Einfluß des Ostseegebietes abhängen, aber da die Verteilung ihrer Positionen, bei denen ja Auffüllungs- und Entstehungsgebiet zusammenfallen, schon im Abschnitt II. C. behandelt wurde, werden sie hier nicht noch einmal aufgeführt.

Von den 1012 wandernden Tiefdruckgebieten der Klassen I und II, die das Ostseegebiet durchqueren, sind genau ein Drittel (337) innerhalb des Untersuchungsraumes entstanden. Damit kommt dem Gebiet eine größere zyklagenetische Bedeutung zu als zum Beispiel Mitteleuropa, wo nach H. MAEDE (1954) die Neubildungen von wandernden Zyklonen (schnelle, polare Tiefs; Vb-artige Tiefs und K-Tiefs) nur einen Anteil von knapp 25 % an der Gesamtzahl erreichen.

Um durch einen Vergleich feststellen zu können, welche Tiefdrucktypen vornehmlich im Ostseeraum entstehen, wurde in der folgenden Tabelle nicht nur die Zahl der Neubildungen, nach Typen und Jahreszeiten aufgeschlüsselt, in der Reihenfolge ihrer Häufigkeit wiedergegeben, sondern auch (in der Spalte am rechten Rand) der Anteil des jeweiligen Typs an der Gesamtzahl aller auftretenden Typen. (Zentralzyklonen und Kalte Tiefs fehlen in der Tabelle, da sie definitionsgemäß nicht im Ostseeraum entstehen können).

Tabelle 26 Verteilung der Neubildungen nach Typen und Jahreszeiten

Tiefdrucktypen	Frühl.	Sommer	Herbst	Winter	Jahr	%(Σ 337)	%(Σ 860)
Okklusionstief	47	36	41	32	156	46,3	43,5
Kaltfronttief	12	26	12	16	66	19,6	9,0
Kaltfrontwelle	8	11	9	6	34	10,1	7,1
Warmsektorzykl.	7	3	4	9	23	6,8	13,6
Staffeltief	6	6	4	4	20	5,9	4,2
Deszend. Zykl.	8	3	-	5	16	4,8	6,4
Aszend. Zykl.	2	2	4	5	13	3,8	14,1
Thermisches Tief	3	1	-	2	6	1,8	1,6
Warmfrontwelle	2	-	1	-	3	0,9	0,3
Summe	95	88	75	78	337		

Nach der Häufigkeit des Vorkommens stehen die Okklusionstiefs an erster Stelle; sie machen fast die Hälfte aller Fälle aus. Bei ihnen handelt es sich vornehmlich um Neubildungen an Frontensystemen von Nordmeerzyklonen, die sich vom Muttertief trennen und innerhalb des Ostseeraumes einen neuen Tiefkern ausbilden. Der Anteil der Okklusionstiefs an Zyklogenesen stimmt mit dem der Gesamtheit ungefähr überein. Ganz anders verhält es sich dagegen mit den Kaltfronttiefs, die zahlenmäßig an zweiter Stelle stehen. Weit mehr als doppelt so viel, als in den Ostseeraum hineinwandern, bilden sich in ihm selbst aus (Vgl. Tab. 26). Diesen Typ, bei dem die Verwirbelung der Kaltfront durch die topographischen Gegebenheiten begünstigt wird, kann man deshalb als eine autochthone Erscheinung des Ostseeraumes bezeichnen. Das gleiche gilt, wenn auch in abgeschwächtem Maße, für die Kaltfrontwellen, bei denen der Neubildungsanteil um ein Drittel über dem des Gesamtauftritts liegt.

Bei den restlichen Typen überwiegen die außerhalb des Gebietes liegenden Entstehungsorte. So ist die Zahl der Tiefdruckgebiete mit geöffnetem Warmsektor, die in das Untersuchungsgebiet hineinziehen, ungefähr doppelt so hoch wie die der im Ostseeraum entstandenen Warmsektorzyklonen. Auffällig ist der geringe Anteil der Aszendierenden Zyklonen, der bei den Neubildungen nur knapp 4 % ausmacht, während dieser Typ an der Gesamtzahl einen Anteil von über 14 % erreicht. In der Tatsache, daß viele Zyklonen, die nicht im Ostseeraum entstanden sind, hier erst unter Ausbildung eines Höhentiefs ihre vertikale Struktur erheblich ändern, kommt eine stärkere Vertiefungstendenz im Ostseegebiet zum Ausdruck.

Die räumliche Verteilung der Neubildungen in den einzelnen Jahreszeiten geben die folgenden Abbildungen wieder. Dabei weist der den Signaturen angehängte kurze Strich in die Richtung, in die das entstandene Tief abzieht.

Im Frühjahr erreicht die Zahl der Neubildungen ihr Maximum. Vergleicht man die 95 Fälle mit der Gesamtzahl aller im Frühjahr auftretenden Zyklonen (235), so stellt man fest, daß 40,4 % aller Tiefs erst im Ostseeraum entstehen. Dabei entfällt fast genau die Hälfte aller Zyklogenesen auf die Okklusionstiefs, die jetzt das Maximum ihres Auftretens aufweisen. Auch die Bildungen von Deszendierenden Zyklonen sind im Ostseeraum im Frühjahr am häufigsten.

Die Masse aller Neubildungen konzentriert sich im Ostseeraum südlich des 60. Breitenkreises (Vgl. Abb. 91, S. 182). Neben einer stärkeren Massierung im Skagerrak und Kattegatt, an der alle Typen beteiligt sind, tritt auch die südöstliche Küste durch eine größere Zahl von Positionen hervor. Hierbei handelt es sich zumeist um Okklusionstiefs, die in den Bahngruppen IV bis VIII abziehen. Durch einen neubildungsarmen zonalen Streifen von dem südlichen Häufungsgebiet getrennt, findet sich ein zweites zyklogenetisch aktives Gebiet in der Bottenwiek, das so deutlich zu keiner anderen Jahreszeit hervortritt. Neben den Okklusionstiefs bilden hier vor allem Kaltfrontwellen und Staffeltiefs eine geschlossene Isobare aus.

Die vorherrschende Richtung, die von ungefähr der Hälfte aller Neubildungen eingeschlagen wird, führt nach Südost. Das bedeutet gleichzeitig, daß etwa 50 % der Zyklonen der Bahngruppen VII und VIII sich im Frühjahr erst ostwärts der Skanden bilden.

Die Verteilung im Sommer weist ein ganz anderes Bild auf (Vgl. Abb. 92, S. 183). Der südliche Ostseeraum und besonders die Ostsee selber ist frei von Neubildungen. Dafür zieht sich jetzt ein breites Band von Positionen vom Skagerrak bis zur Bottenwiek. Hierbei handelt es sich fast ausschließlich um Neubildungen bei südwestlicher Strömung (Bahngruppen IV und V), deren Genese zwar durch die orographischen Verhältnisse im Skagerrak angeregt wird, die aber erst in einiger Entfernung von diesem Gebiet ein abgeschlossenes Tief ausbilden. Bei den meisten Tiefs handelt es sich um selbständige, weiterwandernde Randstörungen von Nordmeerzyklonen, aber auch die Fälle, in denen sich das neuentstandene Ostseetief über der Barentssee wieder mit dem Muttertief vereinigt, sind nicht selten.

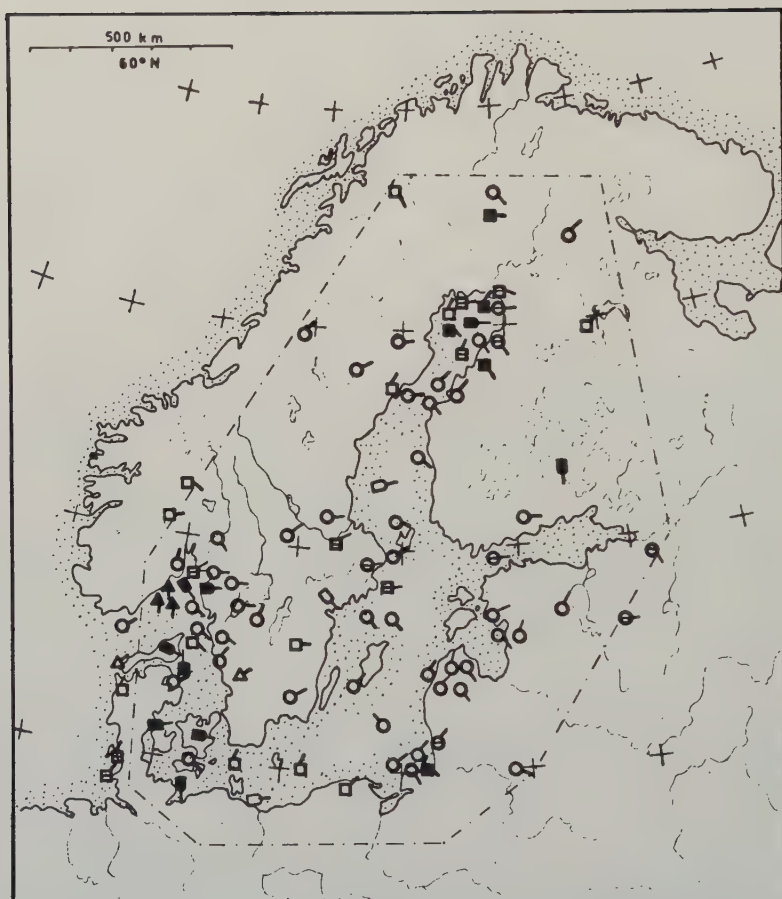
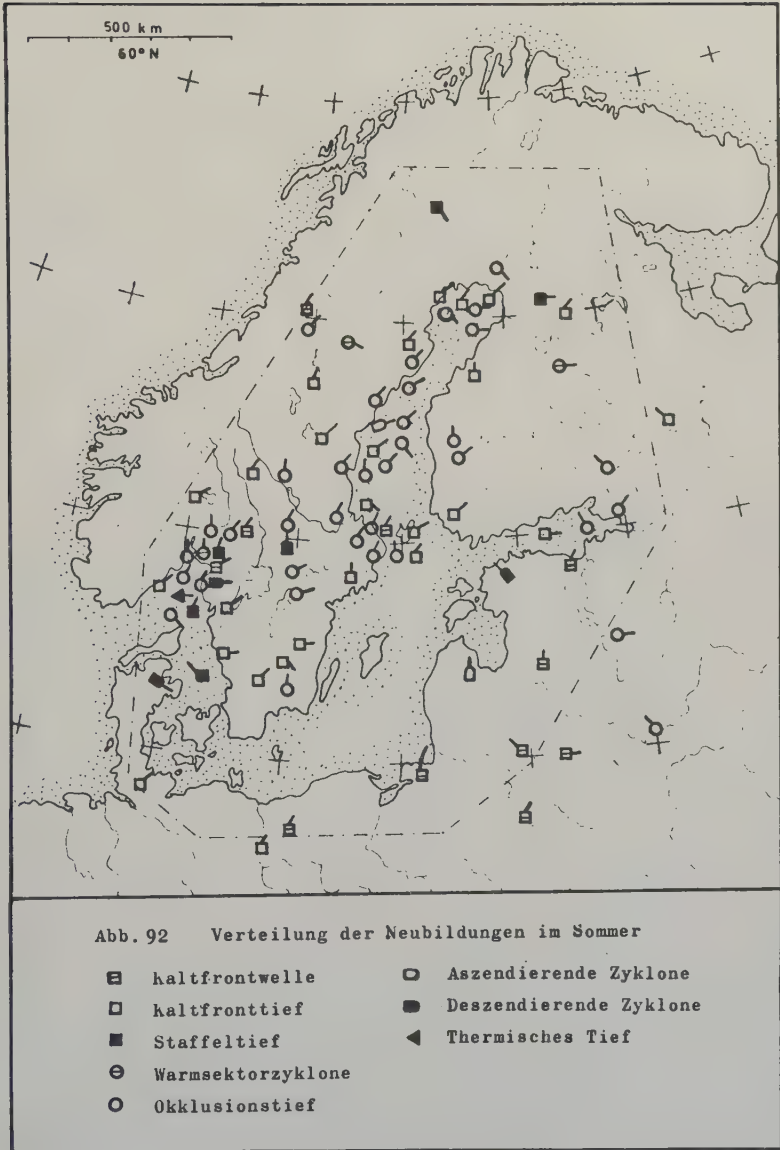


Abb. 91 Verteilung der Neubildungen im Frühjahr

- | | | | |
|---|-------------------|---|------------------------|
| ☐ | Kaltfrontwelle | ◻ | Azzendierende Zyklone |
| ◻ | Kaltfronttief | ■ | Deszendierende Zyklone |
| ■ | Staffeltief | ◁ | Warmfrontwelle |
| ⊕ | Warmsektorzyklone | ◀ | Thermisches Tief |
| ○ | Okklusionstief | | |



Obwohl die Okklusionstiefs wie zu allen Jahreszeiten auch im Sommer dominant auftreten, erreicht die Zahl der Kaltfrontwellen und besonders die der Kaltfronttiefs einen beachtlichen Anteil; beide weisen jetzt das Maximum ihres Auftretens auf. Daß sie sich vornehmlich über dem Festland bilden, läßt auf einen größeren Einfluß des erwärmten Untergrundes schließen. Im Gegensatz zum Frühjahr ziehen die meisten Neubildungen im Sommer nach Nordosten ab. Der Anteil der Neubildungen an der Gesamtzahl aller Tiefs (230) beträgt im Sommer 38,2 %.

Im Herbst erreicht die Zahl der Neubildungen ihr Minimum. Hierin kommt eine Parallelität zur Gesamtheit aller wandernden Zyklonen zum Ausdruck, die zu dieser Jahreszeit auch die geringste Häufigkeit aufweist. Eine ähnliche Erscheinung zeigt sich in Mitteleuropa, wo die Zahl der Entstehungsgebiete nach H.MAEDE (1954) im November nur rund 2/3 des Mai-Wertes ausmacht. Im Gegensatz zum absoluten Auftreten liegt die relative Zahl der Neubildungen im Verhältnis zur Gesamtzahl (185) im Herbst aber mit 40,5 % an der Spitze aller Jahreszeiten. Die meisten Neubildungen ziehen in den Richtungen NO und SO ab. Beide weisen einen gleich hohen Anteil auf (Vgl. Abb. 93, S. 185). Anders als im Sommer sind die Landmassen weitgehend frei von Entstehungsgebieten. Diese beschränken sich jetzt wie im Frühjahr auf die Küstengebiete, wo neben den unterschiedlichen Reibungswiderständen auch der größere Temperaturgegensatz zwischen Land und Meer eine Zyklogese fördert. Als ein Gebiet stärkster Konzentration tritt das Skagerrak hervor, wo sich die Tiefdruckgebiete hauptsächlich bei Südwestströmungen bilden.

Auch im Winter sind die Landmassen fast frei von Neubildungen (Vgl. Abb. 94, S. 186). Obwohl sich die Positionen wie im Herbst auf die Wasserflächen beschränken, ist die Verteilung jetzt sehr viel gleichmäßiger. Besonders die südliche Ostsee verzeichnet mehr Positionen als im Herbst, während die starke Konzentration im Skagerrak weitgehend geschwunden ist.

Während im Herbst die Okklusionstiefs über die Hälfte aller Fälle ausmachen, geht ihr Anteil im Winter auf das Jahresminimum zurück; dafür treten die Kaltfronttiefs wieder mehr in den Vordergrund. Die Zahl der Aszendierenden Zyklonen erreicht zwar im Winter ihr Maximum, der Anteil dieses Typs ist aber mit rund 6 % sehr gering. - Der Anteil der Neubildungen (Gesamtzahl 214) ist mit 36,4 % im Winter am geringsten.

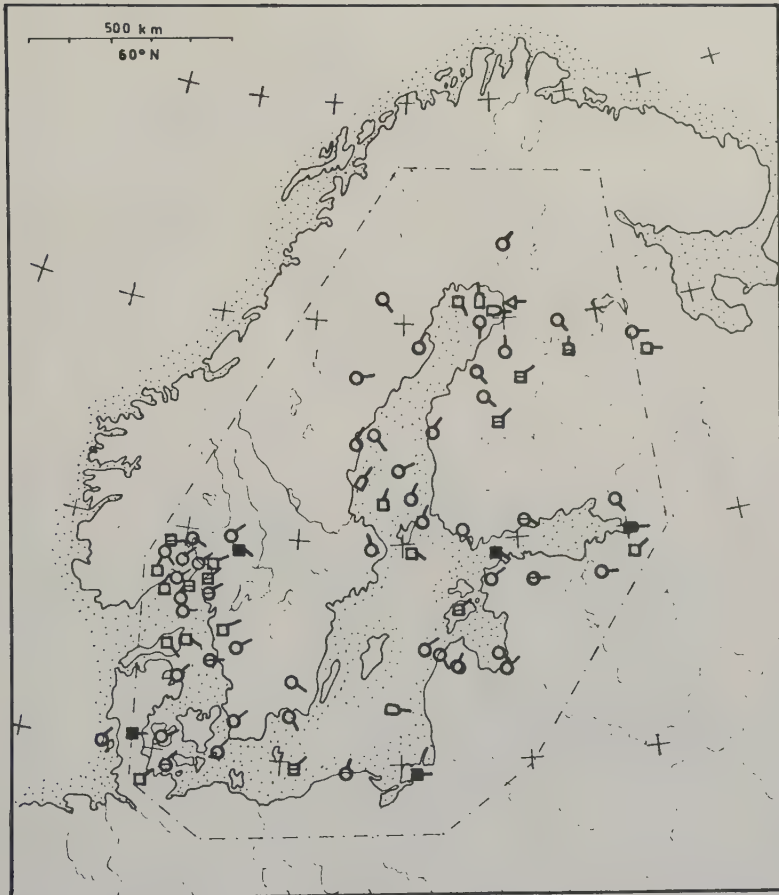
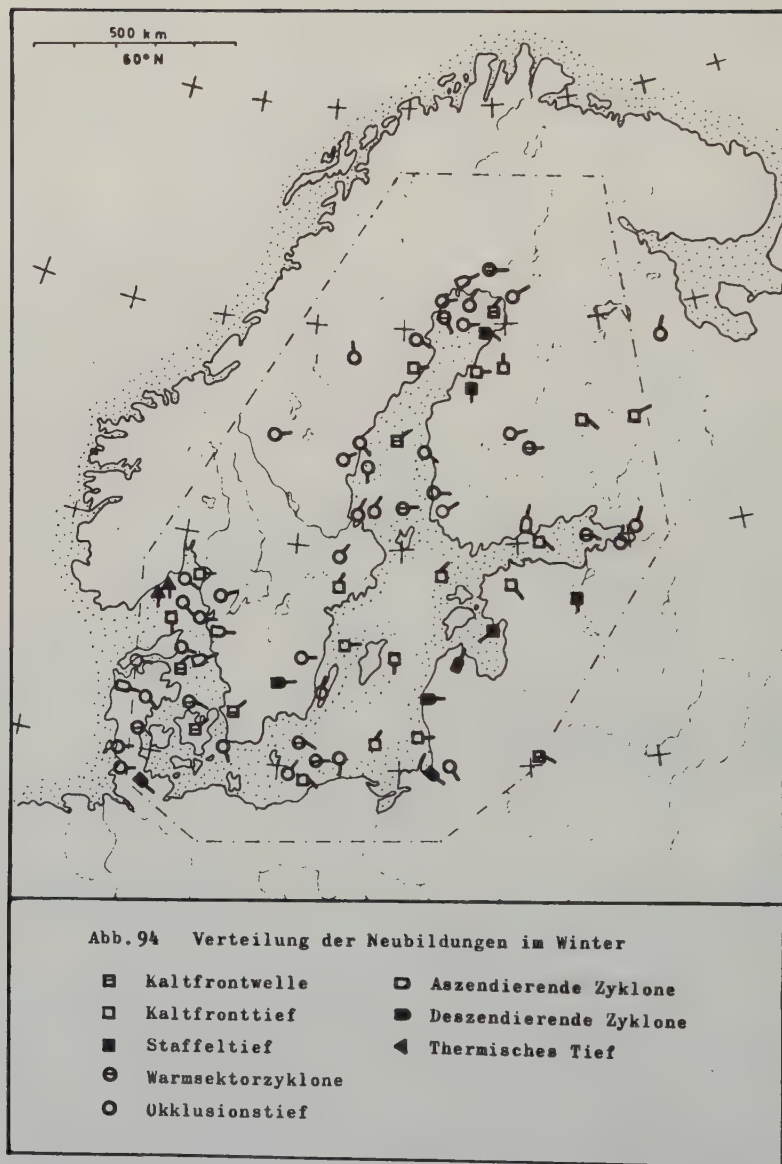


Abb. 93 Verteilung der Neubildungen im Herbst

- | | |
|---------------------|-------------------------|
| ■ Kaltfrontwelle | □ Aszendierende Zyklone |
| □ Kaltfronttief | ◁ Warmfrontwelle |
| ■ Staffeltief | |
| ⊙ Warmsektorzyklone | |
| ○ Okklusionstief | |



Da die Abbildungen zu allen Jahreszeiten eine mehr oder minder starke Konzentration von Neubildungen im Skagerrak zeigen, soll auf die synoptischen Vorgänge, die zu ihrer Entstehung führen, näher eingegangen werden. Nach H.G.MACHT (1937, S. 200ff) lassen sie sich in drei Punkten zusammenfassen:

1. Zieht eine Nordmeerzyklone nach Mittel- oder Nordnorwegen, so schmiegt sich die Warmfront dem Verlauf der west- und südwestnordwestischen Küste an. Während der Nordteil der Front in seinem weiteren Vordringen durch das Gebirge gehemmt wird, dringt die Warmluft südlich des Gebirgswalls zungenförmig in das Skagerrak vor und verursacht die Ausbildung eines flachen Randwirbels. Dieser ist aber nicht sehr beständig und füllt sich über Schweden schnell wieder auf, sobald die Warmfront das Gebirge überschritten hat.
2. Verlagert sich eine Zyklone, die nur noch einen schmalen Warmsektor aufweist, vom Nordmeer nach Mittel- oder Nordnorwegen, wird die Warmfront wie bei 1. durch das Gebirge gebremst und es kommt zum Zusammenklappen des Warmsektors. Aus dem im Skagerrak übriggebliebenen Warmluftansatz entwickelt sich dann eine neue Zyklone, die oft unter Vertiefung das südliche Ostseegebiet zyklonal beeinflusst. In diesem Fall handelt es sich um eine echte "Bjerknes-Randzyklone", die sehr wetterwirksam sein kann.
3. Ein dem Bjerknes-Effekt ähnlicher Vorgang kommt dadurch zustande, daß sich südlich einer Nordmeerzyklone ein Pseudo-Warmsektor bildet, der auf der Vorderseite von einer Okklusion und auf der Rückseite von einer ausgeprägten sekundären Kaltfront begrenzt ist. Wird diese Okklusion an der südnorwegischen Küste am weiteren Vordringen gehindert, kommt es ebenso wie bei 2. zu einem Zusammenklappen des Pseudo-Warmsektors, wodurch sich ebenfalls eine Randzyklone bildet. Dieser Fall ist bei den Skagerrakzyklonen am häufigsten vertreten. Die Wetterauswirkungen sind aber gering, da es sich um ähnliche Luftmassen von geringer thermischer Gegensätzlichkeit handelt.

Die Antwort auf die Frage, welcher dieser drei Vorgänge bei der Neubildung von Zyklonen im Skagerrak die entscheidende Rolle spielt, muß einer mehr meteorologisch orientierten Untersuchung vorbehalten bleiben. Im Rahmen dieser Arbeit kann nur das "wo" und "wann", nicht aber das "warum" untersucht werden; denn "ist im Einzelfall der orographische Einfluß verstärkt wirksam, so handelt es sich dabei offenbar um ganz spezielle Strömungssituationen, die vermutlich nicht allein durch synoptische Betrachtungen erfaßt werden

können. Möglicherweise müssen dazu noch dynamische Gleichgewichtsbetrachtungen angestellt werden" (B.BARG 1959, S. 90).

Die Bedeutung von Skagerrakzyklonen für die zyklonale Beeinflussung des Ostseeraumes darf nach den Abb. 91 - 94 nicht überschätzt werden. Zwar tritt das Skagerrak zu allen Jahreszeiten durch eine stärkere Massierung von Entstehungsgebieten hervor, aber die Neubildungen in dem Raum zwischen Arendal und Karlstad und Oslo und Ålborg machen nur knapp $1/5$ aller Zyklogenese im Ostseeraum aus. Damit kommt dem übrigen Untersuchungsgebiet eine größere zyklogenetische Bedeutung zu, als man bei flüchtiger Durchsicht der Wetterkarten vermuten würde.

7. Die Auffüllungsgebiete

Während der Anteil der Neubildungen an den 1012 wandernden Tiefdruckgebieten der Klassen I und II genau $1/3$ beträgt, liegt der Anteil der Auffüllungsgebiete mit 37,6 % nur geringfügig darüber. Die Zahl der absterbenden Zyklogenese wird also durch die der Neubildungen in etwa aufgewogen. Ein ähnlich ausgeglichenes Verhältnis wurde von H.MAEDE (1954) auch für Mitteleuropa festgestellt, wo den Entstehungsgebieten (25 % aller auftretenden bahnbildenden Zyklogenese) eine gleich große Anzahl von Auffüllungsgebieten (24 %) gegenübersteht. Der absolute Prozentsatz beider Fälle liegt im Ostseeraum aber beträchtlich höher, so daß auf Grund der topographischen Verhältnisse des Untersuchungsraumes nur rund $1/3$ aller bahnbildenden Zyklogenese das Ostseegebiet in seiner vollen Länge durchquert.

In der folgenden Tabelle sind im Gegensatz zu Tab. 26, S. 180 auch Zentralzyklonen und Kalte Tiefs aufgeführt, da sich natürlich auch diese Typen im Ostseeraum auffüllen. Die Prozentzahlen in der äußersten rechten Spalte beziehen sich deshalb auf die Gesamtzahl aller wandernden Zyklogenese (1012). Ebenso wie bei den Neubildungen stellen auch bei den Auffüllungen die okkludierten Zyklogenese ohne Höhentief die größte Gruppe. Dabei entspricht ihr Anteil in etwa dem an der Gesamtverteilung. Absolut gesehen entstehen im Ostseeraum aber mehr Okklusionstiefs als sich in ihm auffüllen (156 zu 134). Das Gebiet selbst wirkt also mit diesem Typ noch auf die angrenzenden Räume ein. Das gleiche gilt für die hier wie in Tab. 26, S. 180 an zweiter Stelle stehenden Kaltfronttiefs. Auch bei ihnen überwiegt die Zahl der Neubildungen die der Auffüllungen,

so daß viele im Ostseeraum entstandene Kaltfronttiefs das Gebiet verlassen. Die meisten Tiefs dieses Typs sterben allerdings innerhalb des Ostseeraumes ab. Denn während ihr Anteil an der Gesamtzahl aller Tiefs nur 7,8 % beträgt, liegt er bei der Zahl der Auffüllungsgebiete mit 13,6 % fast doppelt so hoch. Darin, daß nicht nur die meisten Kaltfronttiefs im Ostseeraum entstehen, sondern sich auch wieder in ihm auffüllen, zeigt sich noch einmal, daß es sich bei diesem Typ um eine spezielle Erscheinung des Ostseegebietes handelt. In abgeschwächter Form gilt dasselbe noch für die Kaltfrontwellen, von denen 34 im Untersuchungsgebiet entstehen, dagegen nur 31 absterben. Von den restlichen Typen sind die Thermischen Tiefs erwähnenswert, die mit 1,38 % an der Gesamtzahl vertreten sind, deren Anteil an den Auffüllungsgebieten aber mehr als doppelt so hoch liegt. Bei ihnen handelt es sich vorwiegend um Tiefs, die von der Nordsee ins Skagerrak und in die südliche Ostsee driften und dort absterben.

Tabelle 27 Häufigkeit der Auffüllungsgebiete nach Typ und Jahreszeiten

Tiefdrucktypen	Frühl.	Sommer	Herbst	Winter	Jahr	%(Σ381)	%(Σ1012)
Okklusionstiefs	43	32	25	34	134	35,2	37,5
Kaltfronttief	14	19	8	11	52	13,6	7,8
Zentralzykl.	11	10	10	8	39	10,2	11,9
Warmsektorzykl.	9	10	10	10	39	10,2	11,8
Kaltfrontwelle	7	14	6	4	31	8,3	6,1
Aszend. Zykl.	2	11	8	3	24	6,3	12,2
Staffeltief	8	5	3	3	19	5,0	3,7
Kaltes Tief	3	9	1	1	14	3,7	1,8
Deszend. Zykl.	1	9	1	3	14	3,7	5,5
Therm. Tief	3	2	2	6	13	3,4	1,4
Warmfrontwelle	2	-	-	-	2	0,5	0,3
Summe	103	121	74	83	381		

In den folgenden Abbildungen sind die Positionen verzeichnet, an denen ein Tief zum letzten Mal eine geschlossene Isobare aufweist. Der kurze, angehängte Strich gibt dabei die Richtung wieder, aus der das Tief gekommen ist.

Im Gegensatz zu den Neubildungen zeigt die Verteilung der Auffüllungsgebiete keine so starke Konzentration auf einzelne Zentren. Dagegen kann man feststellen, daß sich insgesamt mehr Tiefs über der Ostsee als über dem Festland auffüllen.

Die meisten der im Ostseeraum absterbenden Okklusionstiefs fallen in das Frühjahr. Ihre Hauptauffüllungsgebiete liegen dabei

vorwiegend östlich des 15. Längengrades, während das Gebiet um Dänemark und das Skagerrak fast frei sind (Vgl. Abb. 95, S. 191). Hier füllen sich neben den flachen Thermischen Tiefs hauptsächlich Kaltfronttiefs auf. Auch die beiden Warmfrontwellen finden hier ihr Ende. Die anderen Typen verteilen sich vornehmlich auf die südliche Ostsee und die angrenzenden Küstengebiete. 38,9 % aller Auffüllungsprozesse fallen in das Frühjahr. Im Sommer dagegen liegt nicht nur die Zahl der Auffüllungen beträchtlich über dem jahreszeitlichen Durchschnitt, sondern der Anteil der Auffüllungen ist jetzt mit 43,8 % am höchsten überhaupt. In dieser Jahreszeit herrschen die südöst- bis südwestlichen Richtungen vor. 1/4 aller absterbenden Zyklonen entfallen allein auf die beiden Bahngruppen IV und V (Vgl. Abb. 96, S. 192). Damit verschiebt sich der Auffüllungsschwerpunkt weiter nach Norden in die Mitte des Ostseeraumes. An dieser Ballung haben aber, wie die angehängten Striche zeigen, auch andere Bahngruppen einen maßgeblichen Anteil, während ein sekundäres Häufungsgebiet in der Danziger Bucht vornehmlich auf die Bahngruppen I und II zurückgeht. Die Kalten Tiefs, deren Anteil im Sommer am höchsten ist, beeinflussen nur das westliche Ostseegebiet; denn sie sterben alle vor Erreichen des 20. Längengrades ab. Die Auffüllungsorte der Deszendierenden Zyklonen, die die gleiche Zahl aufweisen, sind dagegen über das ganze Gebiet verstreut.

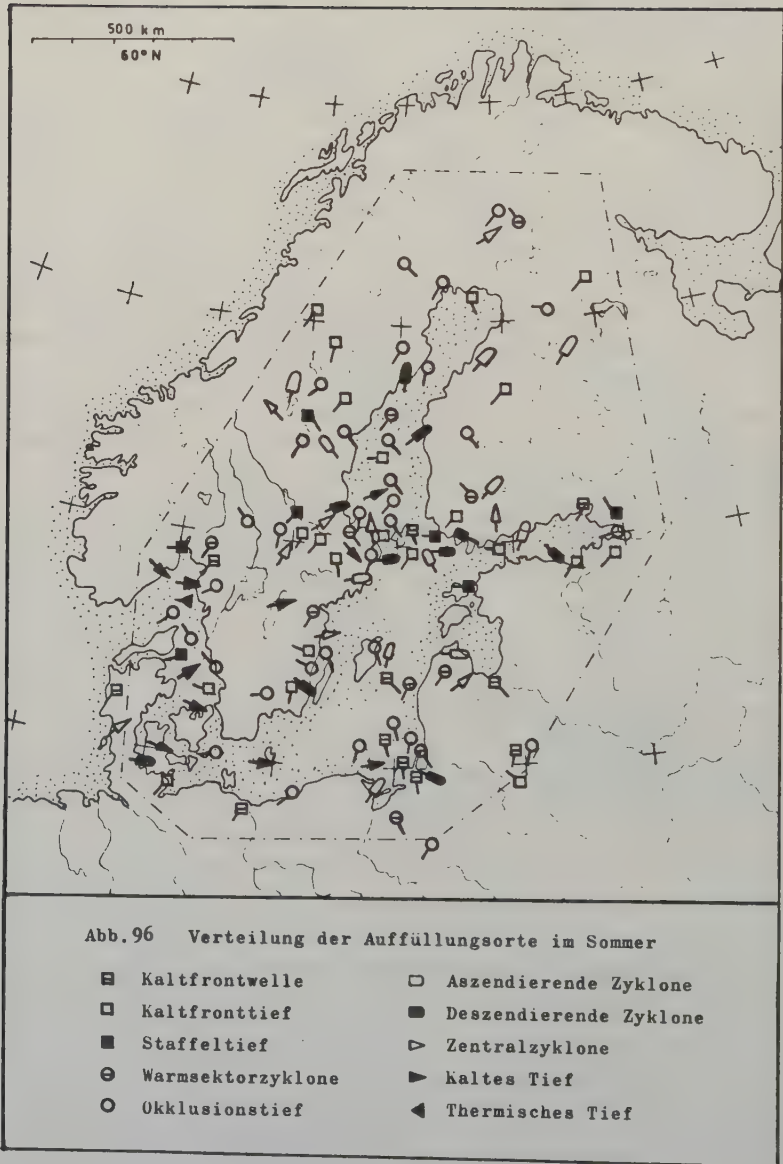
Im Herbst ist die Zahl der absterbenden Zyklonen am geringsten. Dies liegt neben der verstärkt wirksamen Vertiefungstendenz daran, daß die wandernden Tiefdruckgebiete im Herbst die geringste Frequenz aufweisen. Erstaunlicherweise füllen sich nur 1/4 aller Fälle über dem Land auf, während die Masse der Positionen über dem Wasser oder den Küstenstreifen liegt (Vgl. Abb. 97, S. 193). Noch stärker ist diese Tendenz im Winter zu erkennen, in dem nur noch knapp 20 % aller Auffüllungen eindeutig über dem Land stattfinden (Vgl. Abb. 98, S. 194). Nördlich der Bottenwiek liegt keine einzige Position mehr, während der Schwerpunkt sich über der südlichen Ostsee befindet, wo man wegen des warmen Wassers eher ein zyklogenetisches Gebiet vermuten würde.

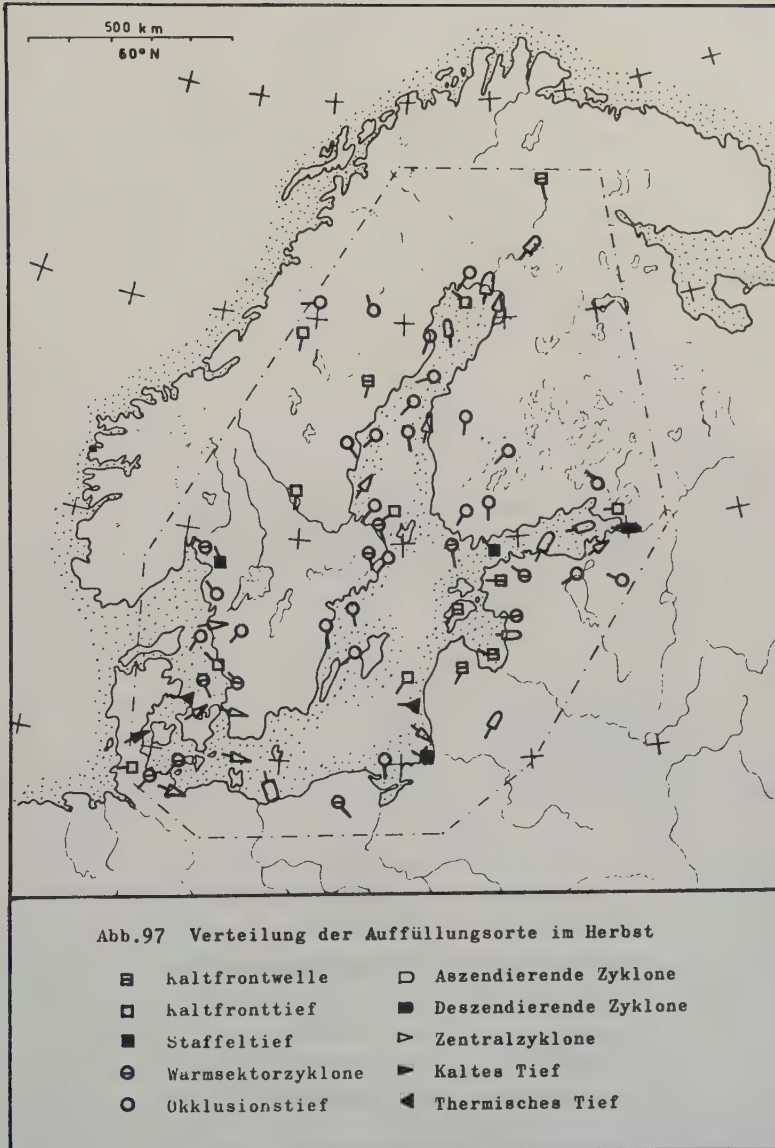
Generell läßt sich also festhalten, daß die Auffüllungsgebiete im Gegensatz zu den Neubildungen keine zu allen Jahreszeiten erkennbare Bindung an bestimmte Zentren aufweisen und daß ihre Verteilung auch nicht durch das thermische Verhalten von Land und Meer bestimmt wird.

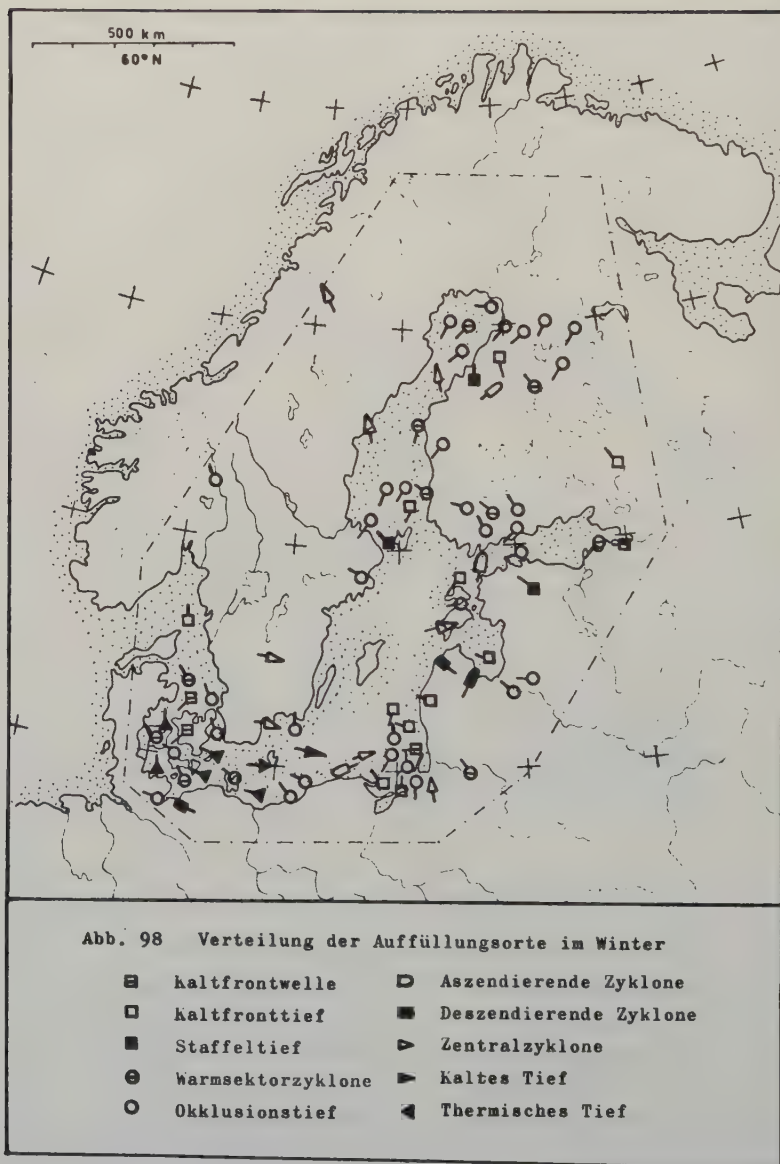


Abb. 95 Verteilung der Auffüllungsorte im Frühjahr

- | | |
|---------------------|--------------------------|
| ☐ Kaltfrontwelle | □ Aszendierende Zyklone |
| ◻ Kaltfronttief | ■ Deszendierende Zyklone |
| ■ Staffeltief | ▷ Zentralzyklone |
| ⊙ Warmsektorzyklone | ▶ Kaltes Tief |
| ○ Okklusionstief | ◁ Warmfrontwelle |
| | ◀ Thermisches Tief |







8. Die Vertiefungs- und Verflachungsgebiete

Zur Ergänzung der in den beiden vorangegangenen Kapiteln gewonnenen Ergebnisse wurde weiterhin untersucht, in wie weit vom Ostseegebiet ein modifizierender Einfluß auf den Kerndruck von wandernden Zyklonen der Klassen I und II ausgeht. Ganz allgemein gilt, daß sich Tiefdruckgebiete, die die Küsten Nordeuropas aus westlichen Richtungen erreichen, sehr oft abschwächen und verflachen. Die Regeneration eines Tiefs ozeanischen Ursprungs über dem Ostseegebiet muß daher immer als Ausnahme gelten. Die allgemeinen Möglichkeiten einer erneuten Vertiefung lassen sich dabei nach R.SCHRÖDER (1929) in folgenden drei Punkten zusammenfassen:

1. Tritt eine Zyklone vom Festland auf eine Wasserfläche über, kann die Abnahme der Bodenreibung zu einer Vertiefung führen, die aber weder sehr kräftig noch sehr anhaltend ist.
2. Vereinigen sich zwei oder mehr kleine degenerierte Zyklonen zu einem größeren System, kann der Nachschub an kinetischer Energie zu einer Neubelebung führen, die aber im allgemeinen keine großen Werte annimmt.
3. Bezieht eine absterbende Zyklone fremde Kaltluftmassen in ihren Bereich mit ein, so führt dies durch die Wirkung der horizontalen Temperaturunterschiede und der Schwerkraft in der Regel zu einer kräftigen Vertiefung. "Der Zyklonenbezirk (kann) ... Nachschübe an potentieller oder kinetischer Energie aus Energievorräten erhalten, die weit weg von der Zyklonenbahn liegen oder die anfänglich nicht an den Grenzflächen konzentriert waren. Dies geschieht dann in Form von sekundären, d. h. noch kälteren oder höheren Kaltluftschwällen, die der Zyklone eine übernormale Lebensdauer verschaffen oder sogar zu einer neuen Vertiefung derselben führen" (T.BERGERON und G.SWOBODA 1924, S. 69). Fälle dieser Art, auf die fast alle größeren Vertiefungen zurückgehen, sind unter anderem von E.PALMÉN (1929) für Mittelrußland, von R.SCHRÖDER (1929) für die Nord- und Ostsee und von R.SCHERHAG (1934) für die Ostsee beschrieben worden.

Es kann nicht Aufgabe dieser Arbeit sein, jeden Fall einer Vertiefung auf seine meteorologischen Ursachen hin zu untersuchen. Dies verbietet schon allein die große Anzahl der bearbeiteten Tiefdruckgebiete. Hier soll vielmehr nur festgestellt werden, in welchem Verhältnis die Zahl der positiven und negativen 24-stün-

digen Druckänderungen zueinander stehen und wo und wann sie auftreten. Dazu wurden alle Positionen, bei denen sich der Kerndruck gegenüber dem Vortag verändert hatte, in zwei Karten für positive und negative Druckänderungen eingetragen. (Da auf dem Arbeitsblatt - Vgl. Abb. 1, S. 11- die Registrierung im allgemeinen erst dann einsetzt, wenn die Tiefdruckgebiete den Raum ostwärts des Greenwich-Meridians erreicht haben, finden sich westlich des Ostseegebietes kaum Positionen, während die meisten der ersten Druckänderungspunkte bei der vorherrschenden West-Ost-Verlagerung der Zyklo- nen erst in der Mitte des Ostseeraumes liegen).

Neben den Positionen wurde die Häufigkeitsverteilung der verschiedenen Änderungsgrößen in jahreszeitlich differenzierten Tabellen festgehalten, wobei das Produkt aus absoluter Anzahl und jeweiligem Druckänderungswert in den Tabellen mit angeführt ist. Aus der Summe aller dieser in einer Jahreszeit aufgetretenen negativen und positiven Änderungsbeträge läßt sich eine Druckänderungs- bilanz ermitteln, während der Durchschnittswert in Millibar pro 24 Stunden (mb/d) die absolute Stärke der Änderung angibt.

Tabelle 28 Häufigkeitsverteilung der interdiurnen Druckänderungen im Frühling

mb/d	(+)	(-)
	abs./mb	abs./mb
5	69/345	47/235
10	24/240	20/200
15	3/120	10/150
20	----	1/ 20
25	----	1/ 20
Summe	101/705	79/625
Durchschnitt	6,9 mb/d	7,9 mb/d
Bilanz		+ 80 mb

Im Frühling überwiegen rein quantitativ die positiven Druck- änderungen. Sie sind im Einzelnen nicht sehr ausgeprägt, weil der absolute Kerndruck der in das Ostseegebiet eintretenden Zyklo- nen schon relativ hoch liegt. Deshalb überschreitet der tägliche posi- tive Änderungsbetrag in keinem Fall 15 mb (Vgl. Tab. 28), so daß der Durchschnittswert mit 6,9 mb/d relativ niedrig liegt. Weder bei den größeren noch bei den kleineren Druckänderungen zeigt sich in der räumlichen Verteilung eine Besonderheit; sie verteilen sich vielmehr sehr gleichmäßig über das gesamte Gebiet (Vgl. Abb. 99, S. 197). - Wesentlich anders verhalten sich dagegen die Vertiefungs-

Abb. 99

Positive Druckänderungen im
Frühling

- 5 mb/d ●
- 10 mb/d ●
- 15 mb/d ●

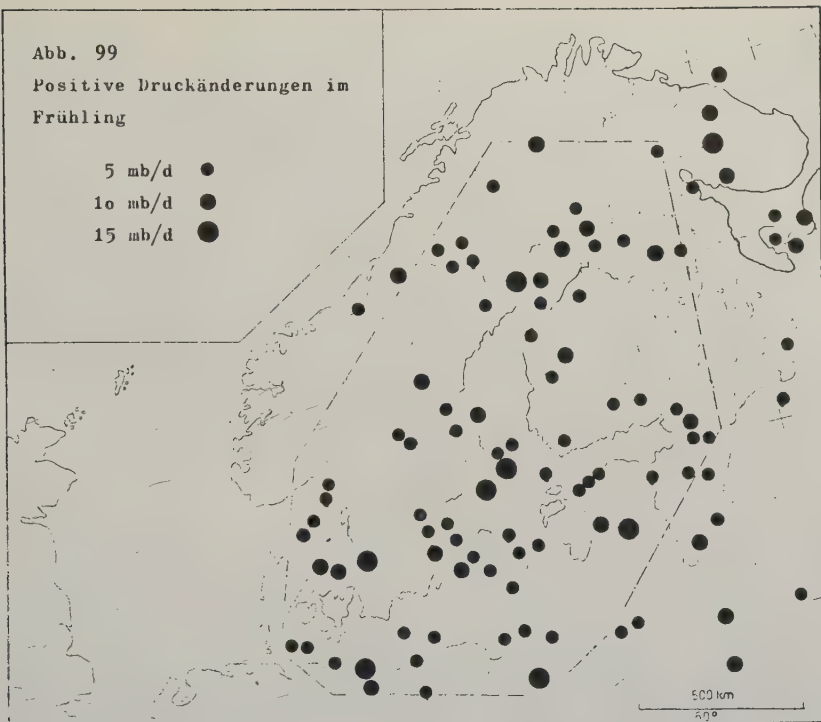
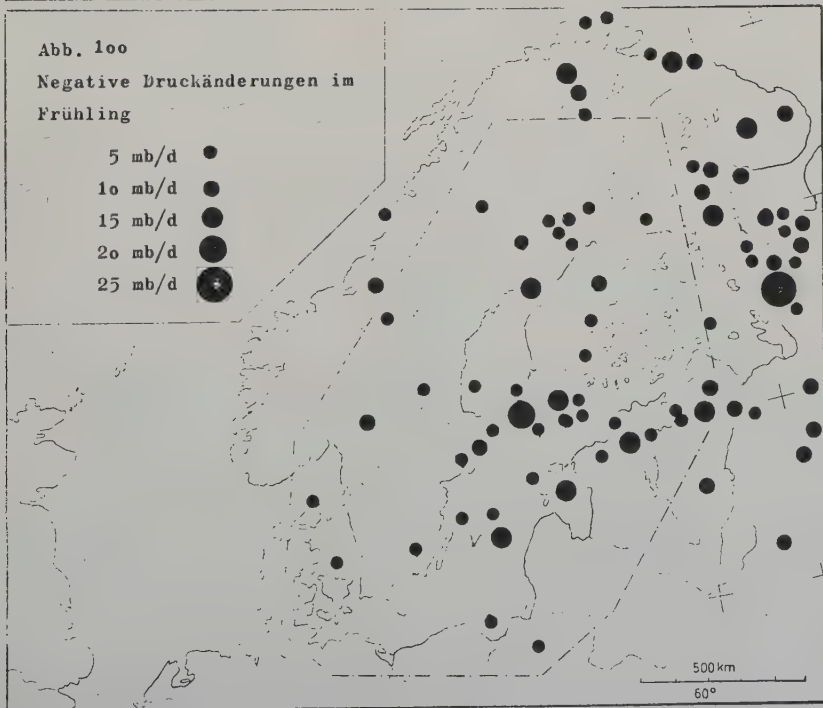


Abb. 100

Negative Druckänderungen im
Frühling

- 5 mb/d ●
- 10 mb/d ●
- 15 mb/d ●
- 20 mb/d ●
- 25 mb/d ●



gebiete. Obwohl nur 79 Fälle auftreten, reicht die Streuung der Druckänderungswerte von 5 bis 25 mb/d, so daß sich ein tieferer Durchschnittswert ergibt (7,9 mb/d). Verursacht werden die größeren negativen Druckänderungen durch arktische Polarluft, die auf der Rückseite von ausgeprägten Höhentrogén nach Süden vorstößt und eine Vertiefung der Zyklonen bewirkt. Als Beispiel sei die Entwicklung vom 1./2. Juni 1962 angeführt, in deren Verlauf sich ein Tiefdruckgebiet auf der Bahn XII (!) vom Baltikum zum Weißen Meer verlagert. Durch Einbeziehung frischer Polarluft fällt dabei der Bodendruck innerhalb von 24 Stunden um 25 mb von 1005 auf 980 mb. - Infolge dieser Abhängigkeit von polarer Kaltluft liegt die Masse der Positionen im mittleren und nordöstlichen Untersuchungsgebiet, während sich südlich des 58. Breitenkreises keine stärkeren Vertiefungsgebiete finden (Vgl. Abb. 100, S. 197). Insgesamt ist die Druckänderungsbilanz (Summe aller positiven Änderungen minus Summe aller negativen Änderungen) im Frühling positiv (+80 mb), denn obwohl qualitativ die negativen Druckänderungen vorherrschen, sind quantitativ die Verflachungen stärker vertreten. Diese allgemeine Auffüllungstendenz im Frühling kommt auch darin zum Ausdruck, daß sich von allen 265 aufgetretenen Zyklonen nur 24 % vertiefen, aber 30 % verflachen, während der Rest eine gleichbleibende Tendenz aufweist.

Den Sommer kann man in bezug auf die 24-stündigen Druckänderungen als die ausgeglichene Jahreszeit bezeichnen, denn nicht nur die Gesamtzahl aller Änderungen, sondern auch die Durchschnittswerte derselben weisen in dieser Jahreszeit die geringsten Werte auf. Stärker als im Frühling liegt der Schwerpunkt der Verflachungen jetzt bei den kleinen Werten, während der Betrag von 15 mb/d nur einmal erreicht wird (Vgl. Tab. 29).

Tabelle 29 Häufigkeitsverteilung der interdiurnen Druckänderungen im Sommer

mb/d	(+)	(-)
	abs./mb	abs./mb
5	69/345	57/285
10	15/150	25/250
15	1/ 15	3/ 45
20	---	1/ 20
Summe	85/510	86/600
Durchschnitt	6,0 mb/d	6,9 mb/d
Bilanz	-90 mb	

Diese Häufigkeitsverteilung läßt auf einen Einfluß der Unterlage schließen, indem durch das erwärmte Festland der Verflachungsprozeß verzögert wird. Dies wird auch durch die räumliche Verteilung der positiven Druckänderungspositionen bestätigt, die sich vorwiegend über dem Land befinden (Vgl. Abb. 101, S. 200). - Auch bei den negativen Druckänderungen zeigt sich eine Abhängigkeit vom erwärmten Festland, denn von den Werten 5 mb/d liegen nur 6 über dem Wasser der Ostsee (Vgl. Abb. 102, S. 200), während sich der Rest auf die Landmasse verteilt. Insgesamt sind aber im Sommer die geringen Werte von 5 und 10 mb/d sehr viel stärker vertreten als zu den anderen Jahreszeiten. - Einzig im Sommer ist die Druckänderungsbilanz geringfügig negativ (-90 mb), was auf das Zusammenwirken von allgemein höherem Bodendruck und leichter Vertiefungstendenz durch das erwärmte Festland zurückzuführen sein dürfte. Von den 276 aufgetretenen Tiefdruckgebieten verflachen nur 23 %, während sich 26 % vertiefen. Hier ist besonders auf die Zyklonen der Bahngruppe III zu verweisen, die aus dem mitteleuropäischen Kerngebiet kommen und von denen sich im Sommer mehr als 30 % über dem Ostseeraum vertiefen, während kein Fall einer Verflachung eintritt. Auch bei Bahngruppe II überwiegen die sich vertiefenden Zyklonen. Insgesamt gesehen sind die Druckänderungen, wie die beiden Durchschnittswerte der Tabelle 29 (S. 198) zeigen, im Sommer aber sehr gering.

Im Herbst dagegen gestalten sich die Verhältnisse sehr viel unruhiger, denn die durchschnittlichen Änderungsbeträge liegen bis zu 2 mb/d über denen des Sommers (Vgl. Tab. 30).

Tabelle 30 Häufigkeitsverteilung der interdiurnen Druckänderungen im Herbst

mb/d	(+)	(-)
	abs./mb	abs./mb
5	58/290	43/215
10	40/400	13/130
15	15/225	9/135
20	1/ 20	2/ 40
25	---	1/ 25
Summe	114/935	68/545
Durchschnitt	8,2 mb/d	8,0 mb/d
Bilanz	+390 mb	

Während dieses Ergebnis für den Herbst zu erwarten war, ist es hingegen erstaunlich, daß die Druckänderungsbilanz für diese Jahreszeit, in der sich der Wärmeüberhang der Ostsee am stärksten

Abb. 1o1

Positive Druckänderungen im
Sommer

- 5 mb/d ●
- 10 mb/d ●
- 15 mb/d ●

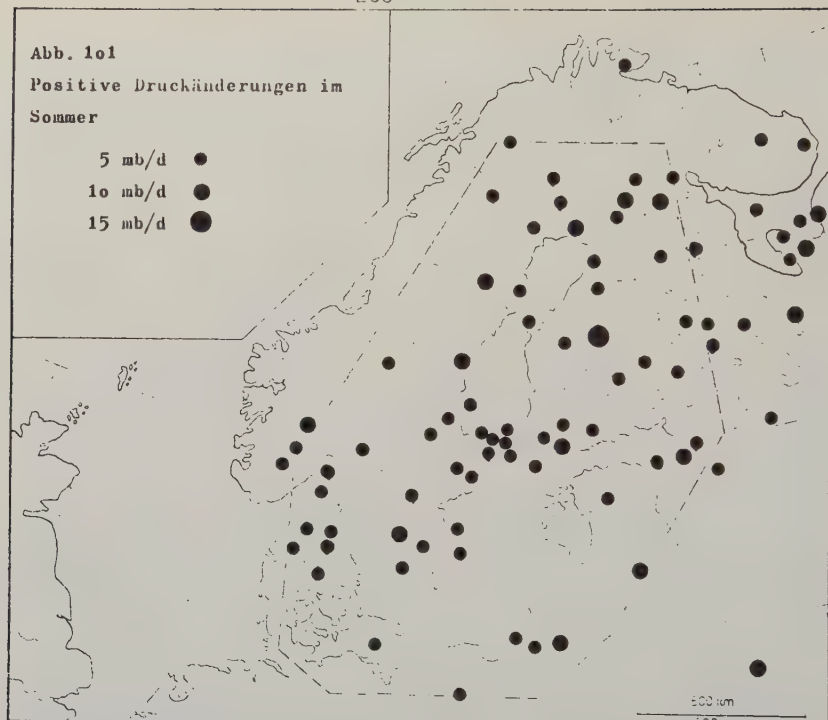
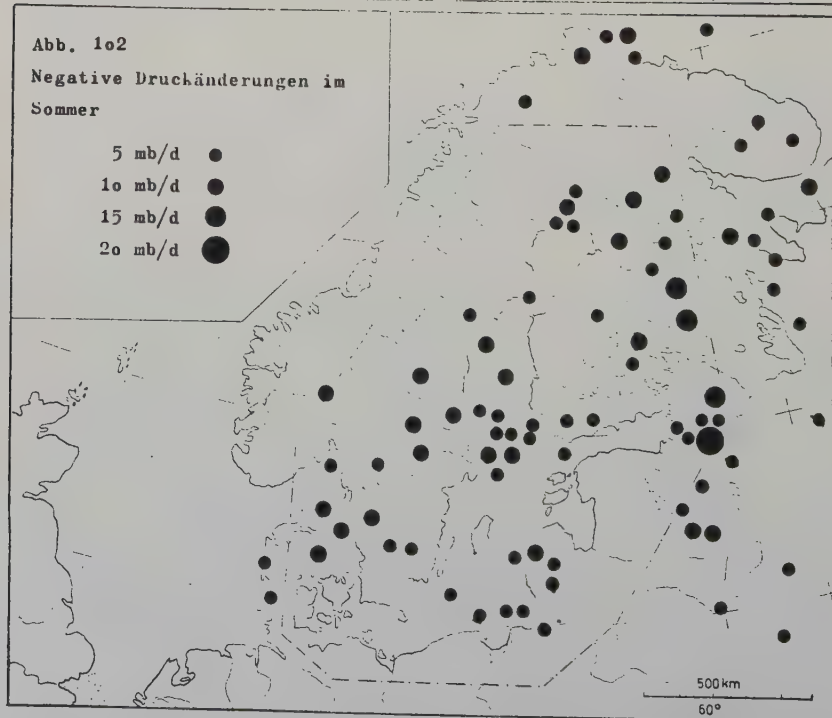


Abb. 1o2

Negative Druckänderungen im
Sommer

- 5 mb/d ●
- 10 mb/d ●
- 15 mb/d ●
- 20 mb/d ●



bemerkbar macht, entschieden positiv ausfällt (+ 390 mb). 114 Verflachungen stehen nur 68 Vertiefungen gegenüber. Eine Erklärung für diese Tatsache muß darin gesehen werden, daß im Herbst die Zyklonen aus westlichen Richtungen allgemein einen tiefen Druck aufweisen. Dieser hat aber schon über der Nordsee oder dem Nordmeer seine stärkste Ausprägung erreicht, so daß für eine nochmalige Vertiefung der Einfluß der Ostsee allein nicht mehr ausreicht. Zwar findet sich die Masse der negativen Druckänderungspositionen hauptsächlich über dem Wasser und den angrenzenden Küstenstreifen (Vgl. Abb. 104, S. 202), aber der starke Druckfall ostwärts von Öland zum Beispiel geht nicht auf den Einfluß der Ostsee, sondern auf dynamische Prozesse zurück, indem sich am 6.12.1965 ein Tiefdruckgebiet aus dem Ärmelkanal im Delta einer ausgesprochen kräftigen Frontalzone innerhalb von 24 Stunden von 985 auf 960 mb vertieft. - Betrachtet man die Verteilung der positiven Änderungspunkte (Vgl. Abb. 103, S. 202), dann muß man feststellen, daß nicht nur die Ostsee genau so dicht besetzt ist wie das Land, sondern daß auch die Verteilung der Druckänderungswerte über der Wasserfläche in etwa dem Durchschnitt entspricht. Die Auffüllungsprozesse werden also nicht wesentlich durch den Wärmeüberhang des Wassers verzögert. Diese allgemeine Auffüllungstendenz kommt auch darin zum Ausdruck, daß sich von 230 aufgetretenen Zyklonen nur 20 % noch vertiefen, während sich 35 % auffüllen.

Noch deutlicher als im Herbst kommt der Gegensatz zwischen dem Ostseegebiet als Ganzem und den westlich anschließenden Wasserflächen allerdings im Winter zum Ausdruck. Als Folge der über den westlichen Meeren erreichten tiefen Kerndrücken, die im Ostseegebiet nicht mehr unterschritten werden können, zeigt sich ein starkes Überwiegen der Verflachungsgebiete. Diese weisen jetzt absolut und relativ ihre höchste Zahl auf. Die höchste überhaupt festgestellte Druckänderung fällt in den Winter, aber sie liegt nicht, wie man vielleicht vermuten würde, im negativen sondern im positiven Bereich. Die Zentralzyklone, die über der Nordsee noch einen Kerndruck von 975 mb aufwies und die sich am 21.1.1960 über Ostpreußen innerhalb von 24 Stunden bis auf 1010 mb auffüllte, zeigt beispielhaft die große Verflachungstendenz über dem Ostseeraum im Winter. Auch die beiden anderen großen Auffüllungsbeträge von 25 mb/d gehen auf tiefe atlantische Zentralzyklonen zurück, die sich über dem Festland verflachen (Vgl. Abb. 105, S. 204).

Abb. 103

Positive Druckänderungen im
Herbst

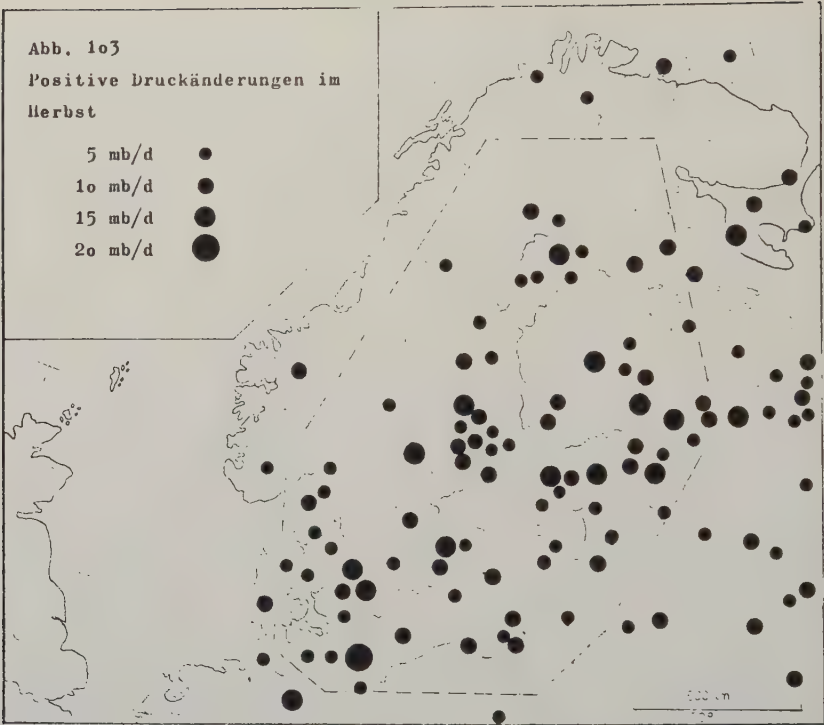
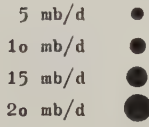


Abb. 104

Negative Druckänderungen im
Herbst

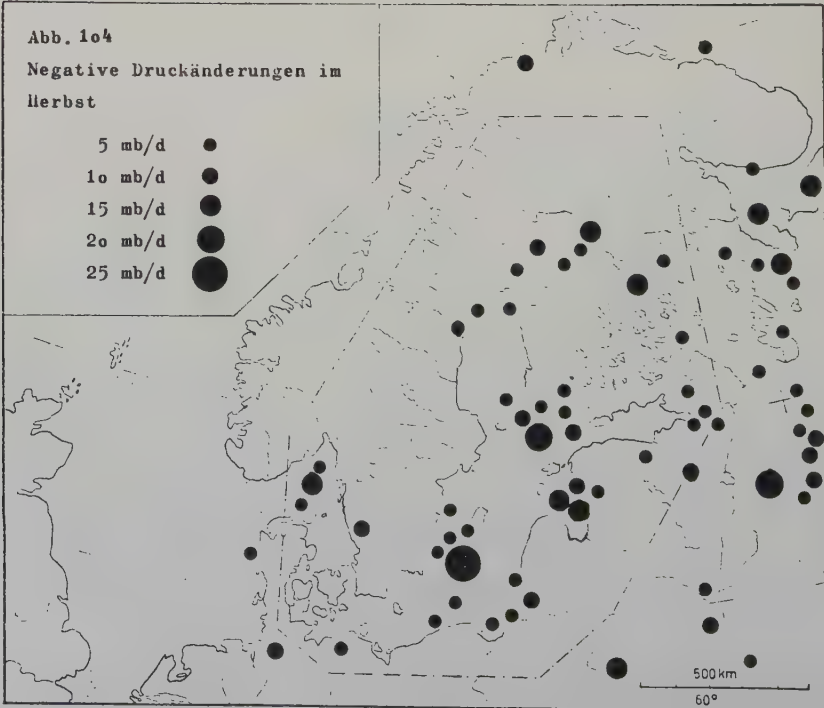
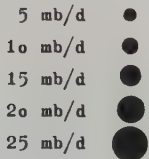


Tabelle 31 Häufigkeitsverteilung der interdiurnen Druckänderungen im Winter

mb/d	(+)	(-)
	abs./mb	abs./mb
5	65/325	22/110
10	46/460	19/190
15	17/255	5/ 75
20	6/120	2/ 40
25	2/ 50	---
35	1/ 35	---
Summe	137/1245	48/415
Durchschnitt	9,0 mb/d	8,6 mb/d
Bilanz		+830 mb

Die räumliche Verteilung der Positionen läßt im Winter auf einen gewissen Einfluß der Ostsee schließen, denn über den Wasserflächen und hier besonders im südöstlichen Teil sind die kleineren Auffüllungswerte sehr viel stärker vertreten, während sich die großen alle nur über dem Land finden. - Auch bei den Vertiefungsgebieten zeigt sich eine gewisse Bindung an die Wasserfläche der Ostsee (Vgl. Abb. 106, S. 204), aber die beiden großen Werte werden auch hier wieder durch den Vorstoß arktischer Kaltluft über der Zyklonenrückseite verursacht. Insgesamt treten die Vertiefungen im Winter aber qualitativ und quantitativ sehr zurück. Dagegen erreicht der Durchschnittswert der täglichen Druckänderungen jetzt mit +9 mb/d sein Maximum. Daher ist die Druckänderungsbilanz im Winter mit +830 mb am stärksten positiv ausgeprägt. Von den 240 auftretenden Zyklonen vertiefen sich nur 17 %, während sich über 41 % auffüllen.

Auf Grund dieser kurzen Übersicht über das Verhalten der 24-stündigen Druckänderungen im Ostseeraum kann man folgende Ergebnisse festhalten:

1. Der Sommer ist die einzige Jahreszeit, in der die Zahl der Vertiefungen, wenn auch nur minimal, überwiegt, während in den übrigen Jahreszeiten die Verflachungen sehr deutlich in der Überzahl sind.
2. Die durchschnittlichen Druckänderungsbeträge sind im Sommer mit 6,4 mb/d am geringsten und im Winter mit 8,8 mb/d am größten. Dies deckt sich mit der von J.v.HAHN und R.SÜRING (1939, S. 273) getroffenen Feststellung: "In den mittleren und höheren Breiten hat der Winter die größte Veränderlichkeit (des Luftdrucks),

Abb. 105

Positive Druckänderungen im
Winter

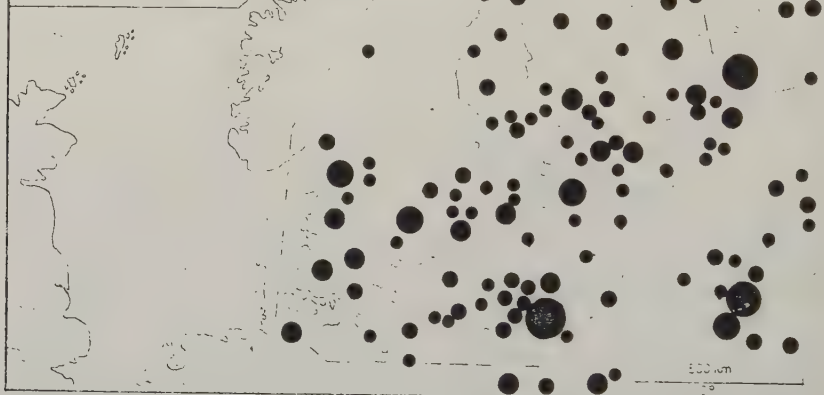
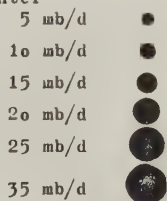
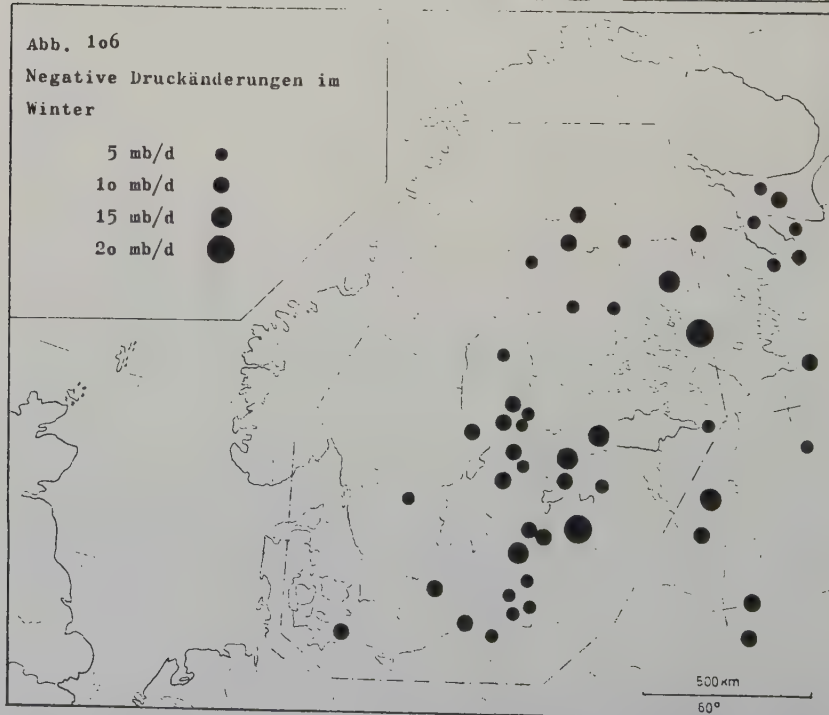
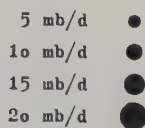


Abb. 106

Negative Druckänderungen im
Winter



der Sommer die kleinste". In Bezug auf die "barometrische Unruhe" (S.EVJEN, 1930) verhalten sich diese beiden Jahreszeiten also konträr.

3. Der Einfluß der Ostsee ist in der kalten Jahreszeit zwar festzustellen, aber die Druckänderungen, die vielleicht durch das warme Wasser mitbewirkt werden, sind relativ klein und überschreiten in der Regel nicht den Betrag von 5 mb/d, wobei es fraglich ist, ob es überhaupt an der Unterlage liegt.

E. Die Kaltlufttropfen

Innerhalb des zehnjährigen Untersuchungszeitraumes konnten über dem Ostseegebiet 146 Kaltlufttropfen festgestellt werden. (Über die Häufigkeitsverteilung der Intensität vergleiche Tab. 1, S. 22). Setzt man diese Zahl zu den 120 Monaten in Beziehung, so ergibt sich, daß durchschnittlich nur ein Fall pro Monat eintritt. Diese recht geringe Zahl wird verständlich, wenn man sich noch einmal die Genese der Tropfen vergegenwärtigt. Die in südliche Richtungen vorstoßende Polarluft wird durch zwei zangenartig umgreifende Warmluftvorstöße von ihrem Quellgebiet abgeschnitten (Vgl. H.KRUHL, 1948). Da diese Vorstöße selbst meistens zwischen dem 60. und 70. Breitenkreis erfolgen, beginnt die eigentliche Abschnürung des Tropfens erst über Mitteleuropa, so daß er in der vorliegenden Untersuchung nicht mehr erfaßt wird. Daher liegt die Zahl der Kaltlufttropfen im gleichen Zeitraum für Mitteleuropa um mehr als 15 % höher (Vgl. G.BAHRENBURG, 1968). Obwohl diese Verhältnisse mit der von U.KÜHN (1956, S. 251) gefundenen Tendenz der Zunahme der Häufigkeiten zum Mittelmeerraum hin übereinstimmt, kann der erste Teil seiner Feststellung, daß nämlich über dem nördlichen Teil Europas kalte Höhentiefs (eine geschlossene Isolinie in der relativen und absoluten Topographie) selten und echte Kaltlufttropfen fast unbekannt seien, nicht bestätigt werden. Nimmt man als Grenzwert für "echte" Tropfen mehr als 2 geschlossene Isophysen an, so treten allein im Ostseeraum in den 10 Jahren 49 echte Tropfen auf (Vgl. Tab. 1, S. 22). Wahrscheinlich können die von U.KÜHN zu Grunde gelegten Jahre 1949 bis 1952 für diesen Fall nicht als repräsentativ gelten.

Wie eingangs schon angedeutet, soll die zyklonale Beeinflussung des Ostseeraumes, die von den Kaltlufttropfen ausgeht, nach deren Herkunftsrichtung differenziert werden. Diese Einteilung bietet sich insofern als sinnvoll an, als den verschiedenen Luftmassen auch unterschiedliche Wettereinflüsse zugeordnet sind. Da die Einzelbahnen der Tropfen im allgemeinen aber sehr viel unregelmäßiger als die der Bodenzyklonen verlaufen, ist eine Zusammenfassung zu parallelen Richtungen nicht möglich. Während die Bodenzyklonen hauptsächlich von der nur langsam die Richtung ändernden Höhenströmung gesteuert werden, können bei Kaltlufttropfen von einem zum nächsten Termin plötzliche Richtungsänderungen eintreten, wenn sich in ihnen durch labile Umlagerungen die Druckverhältnisse ändern, oder wenn durch äußere Einflüsse (Höhenhochkeil) an einer Seite der Gradient versteilt wird, so daß die Geschwindigkeitsverteilung asymmetrisch wird. Infolgedessen konnte bei der Zusammenfassung zu Bahngruppen nur grob nach Haupt- und Nebenhimmelsrichtung unterschieden werden, aus denen die Tropfen in den Ostseeraum eintreten. Eine Abgrenzung der einzelnen Bahngruppen untereinander mit Hilfe des χ^2 -Testes, wie sie für die Bodenbahnen durchgeführt worden ist, war selten möglich, da sich wegen der relativ geringen Zahl mit Ausnahme der aberranten Kaltlufttropfenbahn nur sehr geringe Unterschiede in der Typenverteilung feststellen ließen. Deshalb wurde neben der Herkunftsrichtung als weiteres Kriterium die gleichartige synoptische Situation zur Abgrenzung herangezogen.

1. Die KSO-Bahngruppe

Mit nur 12 Fällen weist die Südostbahngruppe von allen Kaltlufttropfenbahnen die geringste Frequenz auf. Auch wenn man die Deszendierenden Zyklonen der Bahngruppe I, bei denen es sich ja auch um kalte Höhenzyklonen handelt, mit dazurechnen würde, verbliebe die Südostrichtung in Bezug auf die Häufigkeit an letzter Stelle. Für die Nordwestverlagerung der Tropfen ist die gleiche synoptische Situation maßgebend, die auch für die Steuerung der Bahngruppe I und XVI verantwortlich ist. Vor einem blockierenden russischen Hoch erstreckt sich ein Trog von der Nordsee bis in den osteuropäischen Raum. In ihm schnüren sich über dem Karpatenraum die Tropfen ab, die dort längere Zeit quasistationär verharren

können, da in ihrem Bereich die Druckverteilung symmetrisch angeordnet ist. Erst allmählich versteilt sich auf ihrer Nordostseite gegen das russische Hoch das Druckgefälle, so daß dort die stärkste Strömung entsteht. Entsprechend dieser Strömung verlagern sie sich dann nach Nordwesten in den Ostseeraum, wobei sie immer mehr verflachen. Auch die Ausbuchtung des Troges geht immer mehr zurück, bis schließlich die Höhenströmung über dem nördlichen Ostseeraum wieder einen geradlinigen, nach Nordosten um das russische Hoch herumführenden Verlauf einnimmt. Infolgedessen füllen sich die meisten Kaltlufttropfen über dem Ostseegebiet auf (Vgl. Abb. 107/108, S. 208). Der Geschwindigkeitskoeffizient entspricht mit einem Wert von 1,5 ungefähr dem durchschnittlichen GK der Kaltlufttropfen.

Tabelle 32. KSO-Bahngruppe

Tropfentypen	Frühling	Sommer	Herbst	Winter	Jahr
schwach/flach	1	2	-	-	3
schwach/Trog	-	-	-	1	1
mittel	2	-	1	1	4
stark	1	1	-	2	4
Summe	4	3	1	4	12

Da sich bei dieser Bahngruppe die Kaltlufttropfen über dem Ostseeraum schon in Auflösung befinden, kommen intensive Tropfen nicht vor. Die meisten Höhenzyklonen weisen eine mittlere bis starke Ausprägung auf und auch in der relativen Topographie werden 3 geschlossene Isopotentialen nicht überschritten, was auf die relativ geringe Größe der Kaltluftkörper hinweist. In der jahreszeitlichen Verteilung sind Frühling, Sommer und Winter fast gleich stark vertreten, während das Monatsmaximum mit 3 Fällen im Januar liegt (Vgl. Diagramm 38).

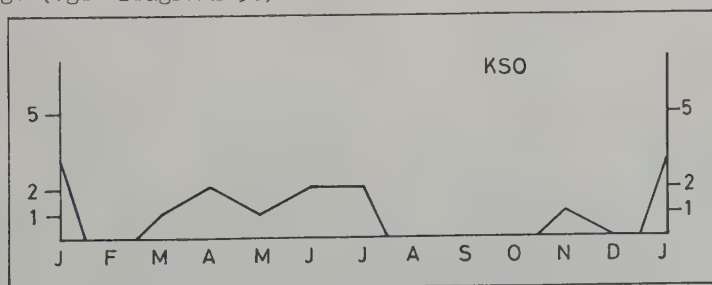
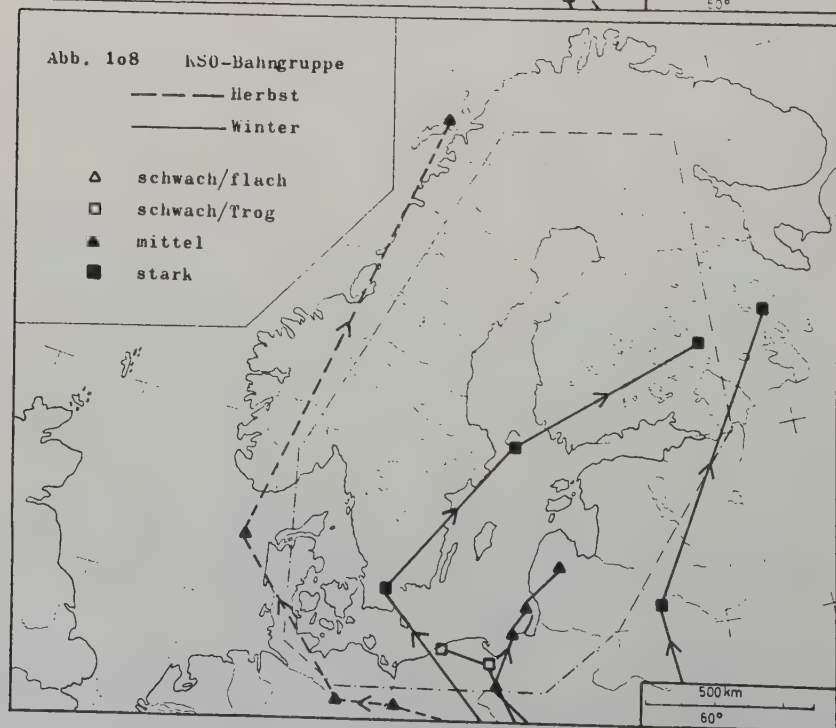
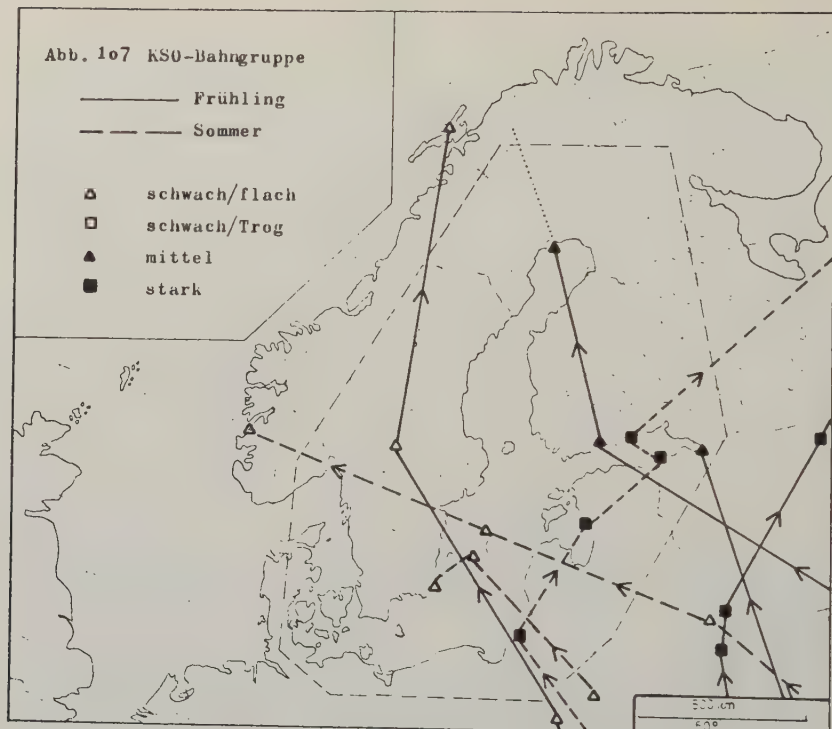


Diagramm 38 Jahresgang der KSO-Bahngruppe



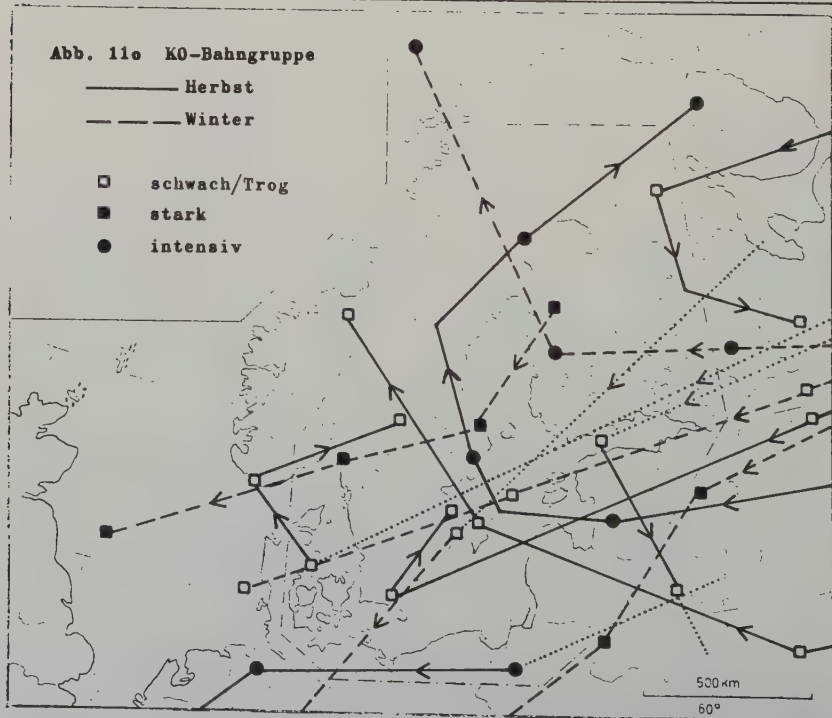
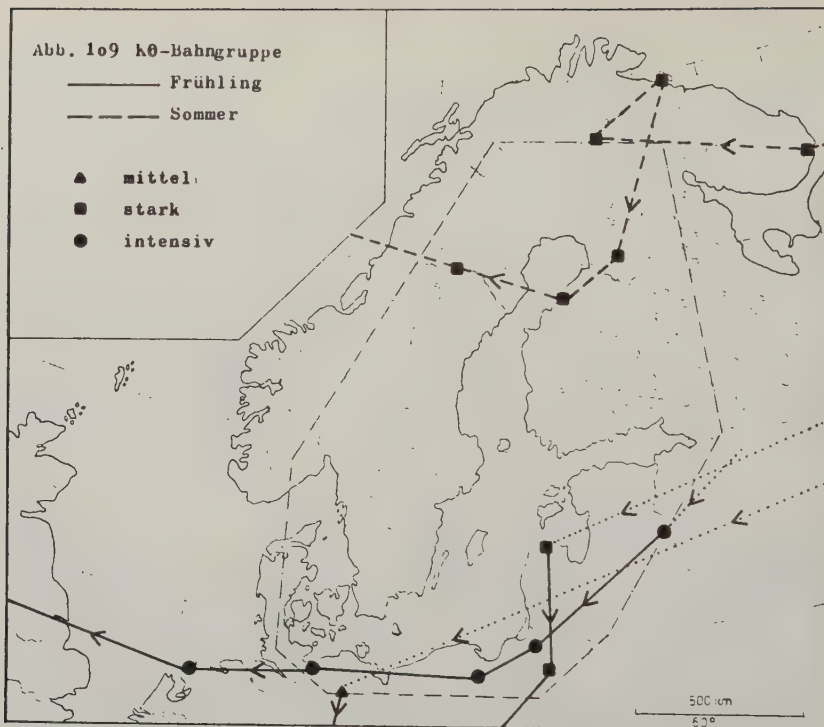
Von August bis Oktober, wenn die zentraleuropäischen Hochlagen gehäuft auftreten, ist die Südostbahn frei von Kaltlufttropfen.

Da die Luftmasse der Tropfen dieser Bahngruppe schon in stärkerem Maße kontinental beeinflusst ist, erreicht die von ihnen verursachte Abkühlung am Boden nur geringe Werte. Weitaus stärker machen sich die Niederschläge bemerkbar, die auf der Nordostseite der Tropfen durch aufgleitende russische Warmluft verursacht werden. Von den auf das Kerngebiet der Tropfen beschränkten Schauern werden am stärksten die polnischen und baltischen Küstengebiete betroffen, da sich über ihnen die Tropfendurchgänge häufen. Besonders im Spätherbst und im Winter macht sich in diesem Raum der labilisierende Einfluß der warmen Ostsee in häufigen Schneeschauern bemerkbar.

2. Die KO-Bahngruppe

Eine völlig andere synoptische Situation als der KSO-Bahngruppe liegt der reinen Ostrichtung zu Grunde. Bei der Großwetterlage, die zur Begehung dieser Bahnen führt, erfolgt vom Nordatlantik ein Vorstoß hohen Drucks nach Nordskandinavien. Auf seiner Südostseite setzt sich in einer korrespondierenden Bewegung Kaltluft in einem nach Mitteleuropa gerichteten Trog nach Südwesten in Bewegung. Im Frühjahr, wenn dieser Kaltluftstrom seine stärkste Ausprägung erreicht, erfolgt die Abschnürung eines Tropfens erst über der südlichen Ostsee, während sie im Herbst und Winter zu meist schon über dem nördlichen Russland stattfindet (Vgl. Abb. 109/110, S. 210). Bleibt eine Brücke hohen Drucks über Nordskandinavien erhalten, dann behält auch der Tropfen seine Südwestverlagerung bei. Reißt die Verbindung dagegen ab, so daß es über Finnland zur Ausbildung eines kräftigen Hochs kommt, werden die Höhenzyklonen um das Hoch herum nach Nordwesten gesteuert.

Während bei den Bodenbahnen die Ostrichtung praktisch keine Bedeutung hat, da nur zwei Tiefdruckgebiete aus östlichen Richtungen das Untersuchungsgebiet erreichen (Vgl. Abb. 65, S. 136), spielt sie für die Verlagerung von Kaltlufttropfen eine größere Rolle. Dabei ist es nicht so sehr die absolute Anzahl - die KO-Bahngruppe steht mit 16 Fällen an vorletzter Stelle - als vielmehr die Intensität der Tropfen, mit der diese Bahngruppe hervortritt, denn $\frac{1}{4}$ aller Fälle weisen 4 und mehr geschlossene Iso-



physen auf. Da die Kaltluftzufuhr aus Osten sehr viel insensiver ist als aus Südosten, treten keine schwachen Tropfen bei flacher Druckverteilung auf.

Tabelle 33 KO-Bahngruppe

Tropfentypen	Frühling	Sommer	Herbst	Winter	Jahr
schwach/Trog	-	-	5	2	7
mittel	1	-	-	-	1
stark	1	1	-	2	4
intensiv	1	-	2	1	4
Summe	3	1	7	5	16

Obwohl das Schwergewicht in der Typenverteilung auf den starken und intensiven Tropfen liegt, ist der GK mit einem Wert von 1,63 recht hoch, da aus der größten Intensität auch größere Druckgegensätze gegenüber dem benachbarten Hoch resultieren. 2/3 aller Fälle erreichen eine mittlere Wanderungsgeschwindigkeit. Die gleichen Verhältnisse zeigen sich auch bei der mitteleuropäischen KO-Bahn, die einen GK von 1,62 aufweist (Vgl. G. BAHRENBERG 1968, S. 135). - Hinsichtlich der Typenverteilung unterscheidet sich die Bahngruppe außer von den aberranten Bahnen von keiner anderen Bahngruppe signifikant, auch wenn man den Vergleich in den Klassen a) schwach und b) Rest durchführt. Die größten Unterschiede bestehen noch zur gegenüberliegenden Bahngruppe KW, aber sie sind nicht signifikant, da bei einem χ^2 -Wert von 2,02 bei einem Freiheitsgrad eine überzufällige Verschiedenheit nur mit 80-90 % Wahrscheinlichkeit gegeben ist.

Nächst der Nordrichtung gehen von den östlichen Kaltlufttropfen die intensivsten Witterungserscheinungen aus, denn bei der KO-Bahngruppe handelt es sich vorwiegend um "echte" Tropfen im Scherhagschen Sinne, d.h. sie sind im Kern extrem kalt und werden von hohem Luftdruck am Boden begleitet. Im Frühjahr wird von ihnen hauptsächlich die südliche Ostseeküste betroffen (Vgl. Abb. 109, S. 210). Während es auf der Vorderseite in der trockenen Festlandsluft, aus der nur vereinzelt Niederschläge fallen, zu einem kräftigen Temperaturrückgang kommt, gleiten auf der Rückseite wärmere Massen auf, die zu ausgedehnten Niederschlagsfeldern führen. Südlich des 60. Breitenkreises frischt der kalte Ostwind kräftig auf, während weiter nördlich im Hochdruckgebiet Windstille herrscht.

Im Sommer erreicht die KO-Bahngruppe ihr Minimum (Vgl. Diagr. 39), denn infolge der anhaltenden Erwärmung des asiatischen Kontinents kann aus Osten jetzt keine Kaltluftadvektion erfolgen. Der einzige auftretende Tropfen kommt aus dem Gebiet von Nowaja-Semlja und durchquert das Ostseegebiet auf sehr nördlicher Breite. Der Steuerungsmechanismus ist allerdings der gleiche wie bei den anderen Tropfen. Nur befindet sich das steuernde Hoch hier im Raum Spitzbergen. Beim Durchzug des Tropfens wird der nördliche Ostseeraum neben einem merklichen Temperaturrückgang von Schauerniederschlägen erfaßt.

Ebenso wie bei der KSO-Bahngruppe bleibt auch die Ostrichtung in den Monaten August bis Oktober frei von Kaltlufttropfen (Vgl. Diagr. 39).

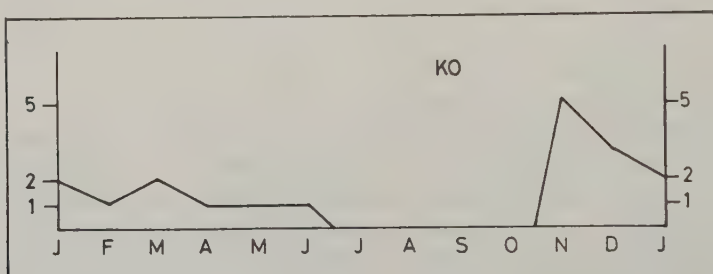


Diagramm 39 Jahresgang der KO-Bahngruppe

Erst im November nimmt die Zahl der Fälle abrupt zu und erreicht in diesem Monat das Maximum. Mit der Konzentration der Häufigkeiten in den Monaten November bis März kann man diese Herkunftsrichtung als typisch für die kalte Jahreszeit bezeichnen, wobei allerdings die geringe Zahl der Fälle zu berücksichtigen ist. Die Einzelbahnen bilden im Winterhalbjahr ein dichtes Muster sich kreuzender Richtungen, in dem der Verlauf des Trog nur noch schwach durch eine Häufung von Positionen längs der Linie Ladogasee/Dänemark zu erkennen ist (Vgl. Abb. 110, S. 210). Dabei überwiegen im Herbst die schwachen Tropfen, die zwar ihre Entstehung einem NO/SW-Trog verdanken, die aber infolge der geringen Mächtigkeit der Kaltluftkörper nur eine geschlossene Isohypse aufweisen. Erst im Verlauf des Winters bilden sich die starken und intensiven Tropfen aus, die strengsten Frost im Gefolge haben. So sank am 9. Januar 1958 auf der Vorderseite eines Tropfens mit 5 Isohypsen in Kajaani/Mittelfinnland die Temperatur

trotz teilweiser Bewölkung auf -41° ab, so daß die Temperatur am Boden tiefer lag als im 500 mb-Niveau.

Ein anderer Kaltlufttropfen dieser Herkunftsrichtung, der das Ostseegebiet vom 17. bis 20. November 1959 auf antizyklonal gekrümmtem Kurs durchquerte und in den zwei Tagen seiner stärksten Ausprägung sogar 6 geschlossene Isohypsen aufwies, ist von T.PELTONEN (1963) untersucht worden. Auf den aerologischen Teil dieser Arbeit einzugehen, würde hier zu weit ab in die Nachbardisziplin der Meteorologie führen. Es sei nur erwähnt, daß die Senkung der Isobarenflächen zuerst in der Stratosphäre erfolgte, von wo aus sich der Wirbel immer weiter nach unten durchsetzte, bis sich schließlich im Höhepunkt der Entwicklung über Stockholm jener für intensive Kaltlufttropfen charakteristische Tropopausen-trichter ausbildete (Vgl. Abb. 111)

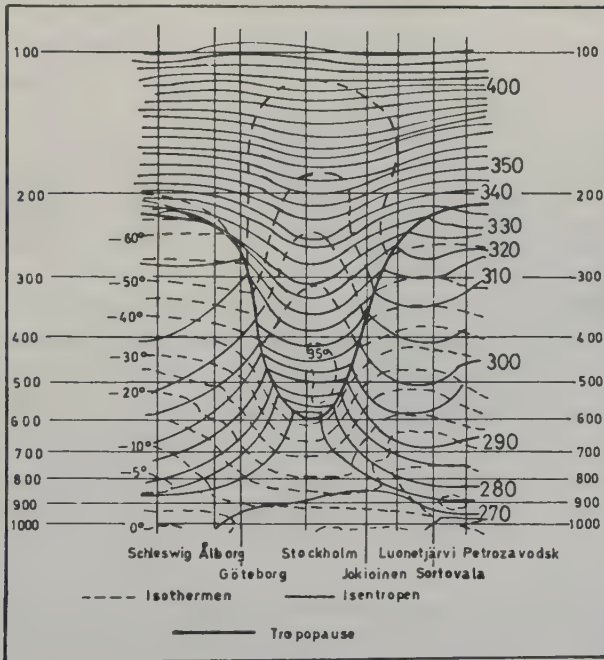


Abb. 111 Schnitt durch den Kaltlufttropfen
am 18. November 1959 um 00 Uhr GCT
nach T.PELTONEN 1963, S. 248

Verursacht wurde die ständige Abkühlung und damit die Vertiefung des Tropfens nicht durch horizontale Advektion neuer Kaltluft, sondern durch Ausstrahlung und vor allem durch adiabatisches Aufsteigen der Luftmassen im Zentrum des Wirbels. Während beim Durchzug dieses Tropfens die Temperaturen beträchtlich unter den Gefrierpunkt absinken, kommt es auf der Rückseite zu ausgedehnten Aufgleitschneefällen. Diese steigern sich zu außergewöhnlicher Heftigkeit an der schwedischen Ostküste südlich von Stockholm, als der Tropfen am 17. über der Ostsee liegt (Vgl. Abb. 112)

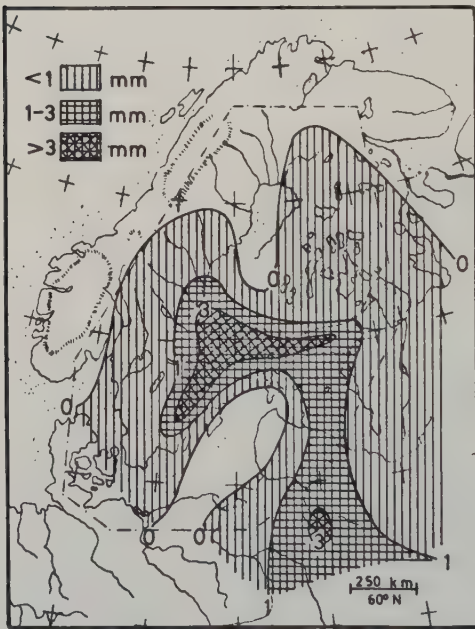


Abb. 112 Verteilung der Niederschlagsmenge in mm am 17. November 1959 zwischen 06-18 Uhr GCT

nach T. PELTONEN 1963, S. 250

Zu der großen Labilität, die das warme Wasser ohnehin schon verursacht - der Lufttemperatur von -5° bis -10° steht eine Wassertemperatur von $+3^{\circ}$ bis $+5^{\circ}$ gegenüber - tritt der Reibungseffekt an der Küste als verstärkendes Moment in Erscheinung, so daß sich wieder der schon beschriebene küstenparallele Streifen höchster Niederschlagsintensität ausbildet.

3. Die KN-Bahngruppe

Aus den nördlichen Richtungen wird der Ostseeraum viel häufiger als aus den östlichen beeinflusst, denn die absolute Zahl der Fälle hat sich gegenüber der letzten Bahngruppe fast verdoppelt. Während das Schwergewicht bei der Ostrichtung aber auf den intensiven Typen liegt, sind bei der Nordrichtung die schwachen Kaltlufttropfen in einem Höhentrog vorherrschend. Dies ist bedingt durch den Weg der Kaltluft, der bei der KO-Bahngruppe über den winterkalten und zumeist unter einer sicheren Schneedecke liegenden Kontinent führt, während die Luftmasse der KN-Bahngruppe durch das europäische Nordmeer und die Barentssee stärker maritim beeinflusst wird, so daß die Kaltlufttropfen nicht so intensiv ausgebildet sind wie bei der Ostbahn.

Tabelle 34 KN-Bahngruppe

Tropfentypen	Frühling	Sommer	Herbst	Winter	Jahr
schwach/Trog	4	1	3	5	13
mittel	2	-	2	4	8
stark	3	-	-	-	3
intensiv	1	1	2	2	6
Summe	10	2	7	11	30

Führt man einen Vergleich der Typenverteilungen in den Klassen a) schwach, b) mittel und c) Rest durch, dann unterscheidet sich die Bahngruppe außer von den aberranten Bahnen nur noch von der benachbarten KNW-Bahngruppe auf dem 5 %-Niveau.

Auch diese Richtung kann man als typische Winterbahn bezeichnen, denn in der kalten Jahreszeit von Oktober bis April treten 2/3 aller Fälle auf (Vgl. Diagr. 40).

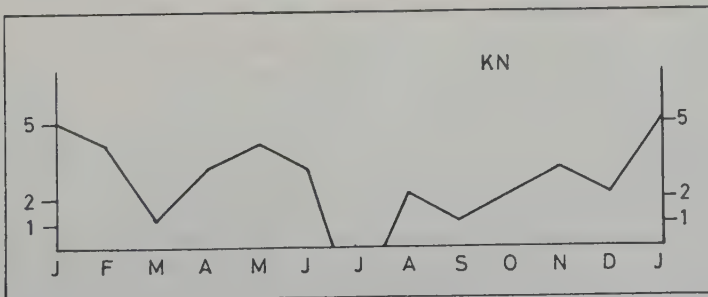


Diagramm 40 Jahresgang der KN-Bahngruppe

Wie es zur Abschnürung der Kaltlufttropfen dieser Richtung kommt, ist von J.KRUHL (1948) anschaulich beschrieben worden. Dem Aufbau eines Hochs über dem östlichen Nordatlantik mit Vorstoß eines Höhenhochkeils zum Nordmeer steht ein Ausfluß arktischer Kaltluft nach Süden gegenüber. Erfolgt nun gleichzeitig ein Vorstoß kontinentaler Warmluft über Nordrußland nach Westen, so wird die Kaltluftzunge eingeeengt und schließlich von ihrem Quellgebiet abgeschnitten. Da die Temperaturgegensätze gegenüber der westlichen maritimen Warmluft größer sind als gegenüber der östlichen, bildet sich meist eine asymmetrische Geschwindigkeitsverteilung der Höhenströmung aus. Eine schwache Südströmung wird dann überkompensiert durch eine stärkere Nordströmung, so daß sich der Kaltlufttropfen nach Süden bewegt. Dabei entspricht die erreichte Geschwindigkeit mit einem Wert von 1,53 etwa dem Durchschnitt aller Kaltlufttropfen. Nur einmal tritt im Januar durch einen besonders intensiven Warmluftvorstoß eine schnelle Wanderung auf.

Während bei den Bodenbahnen der Einfluß der Ostsee in Abhängigkeit von der Jahreszeit in auffälliger Weise hervortritt (Vgl. Abb. 63/64, S.132), ist ein solcher bei den Höhenbahnen nicht zu erkennen. Die Kaltlufttropfen bevorzugen zu jeder Jahreszeit den Weg über die Festlandsmassen, so daß die KN-Bahngruppe durch die Ostsee in zwei Verdichtungslinien über Schweden/Dänemark und über Nordfinnland geteilt wird (Vgl. Abb. 113/114, S. 217). Ob es sich dabei nur um eine zufällige Erscheinung oder um ursächliche Zusammenhänge handelt, ist bei der geringen Zahl der Fälle nicht zu entscheiden. - Im Frühjahr kommt es auf der Vorderseite der dänischen Tropfen zu gewittrigen Schauern, während südöstliche Warmluft auf der Rückseite zu Aufgleitniederschlägen führt. Der Temperaturrückgang ist nur gering, da die Kaltluft bei ihrem Weg über das Nordmeer angewärmt worden ist. Sehr viel stärker sinken dagegen die Temperaturen durch die finnischen Tropfen ab. Auf ihrer Westseite stößt kalte Arktikluft hinter einer oder mehreren Kaltluftstaffeln nach Süden vor. Über der Ostsee reichert sie sich stark mit Feuchtigkeit an, so daß es beim Aufprall auf die südlichen Küstengebiete zu heftigen Schnee- und Regenschauern kommt. Auch über dem Festland wird die Luftmasse im Mai durch die schon verstärkt wirksame Insolation in größerem Maße labilisiert. Aufgleitniederschläge auf der Rückseite kommen nicht vor. - Von den beiden Fällen im August ist nur der intensive, sechs ge-

Abb. 113 KN-Bahngruppe

—— Frühling
 - - - Sommer

□ schwach/Trog
 ▲ mittel
 ■ stark
 ● intensiv

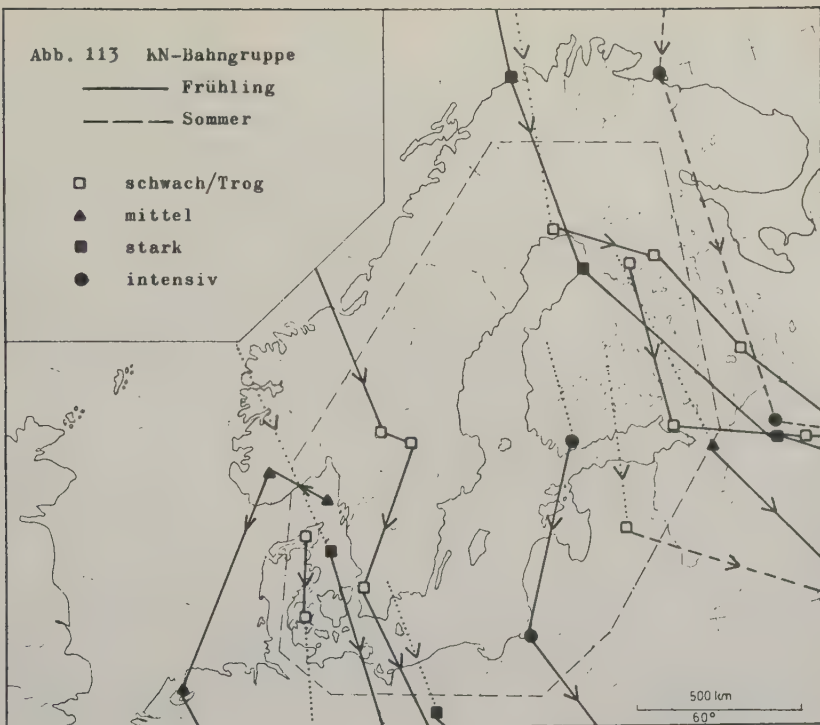
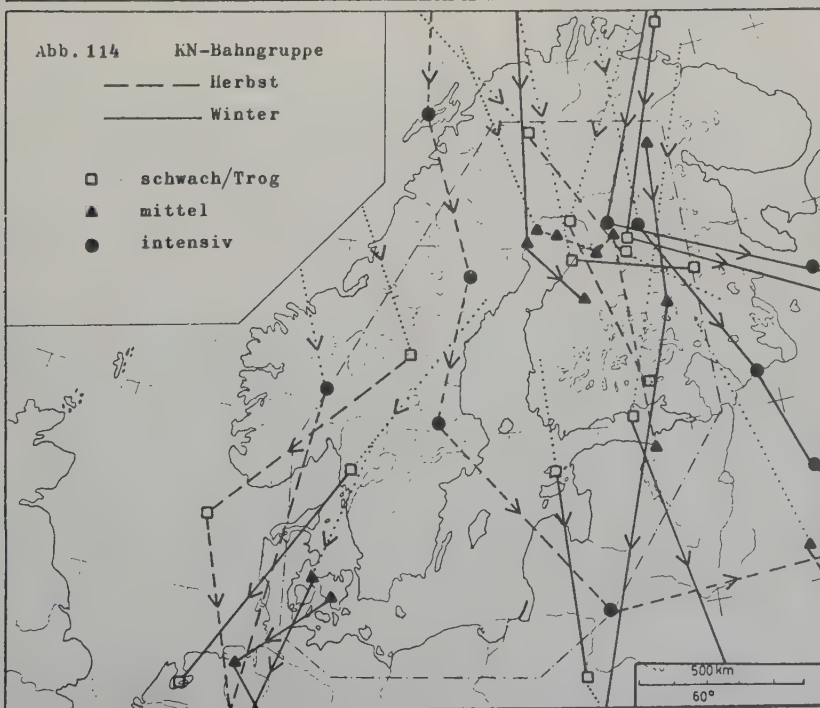


Abb. 114 KN-Bahngruppe

- - - Herbst
 — Winter

□ schwach/Trog
 ▲ mittel
 ● intensiv



schlossene Isohypsen aufweisende Kaltlufttropfen wetterwirksam. Auch auf seiner Westseite erfolgen nach Durchgang der Front Schauerniederschläge und ein kräftiger Temperaturrückgang.

Anfang Oktober nimmt die Aktivität der Nordrichtung wieder zu. Die Tropfen des schwedisch/dänischen Bahnstreifens verursachen im Herbst im südwestlichen Ostseebereich zwar eine merkliche Abkühlung, aber Frost tritt nur im südschwedischen Bergland auf. Dagegen sinkt die Temperatur bei den finnischen Tropfen wegen der Nähe der Arktis immer unter den Gefrierpunkt ab. Selbst bei den nur schwach entwickelten Tropfen kommt es am Boden unter Hochdruckeinfluß zu strengem Frost, der aber auf Finnland beschränkt bleibt. Dagegen reicht das Gebiet mit Schneeschauern von Lappland bis zum Baltikum.

Im Winter erreicht die Richtung mit 11 Fällen ihr Maximum. Im Gefolge der hochreichenden Kaltlufteinbrüche kommt es über dem schneebedeckten Land unter Hochdruckeinfluß zu extrem tiefen Temperaturen. Während die Schneefälle über dem Festland Aufgleitcharakter haben, gehen über der schwedischen und baltisch/polnischen Ostseeküste bei auflandigem Wind kräftige Schneeschauer nieder, durch die in den küstennahen Gewässern die Vereisung stark gefördert wird.

4. Die KNW-Bahngruppe

Nach der West- und Nordrichtung steht die KNW-Bahngruppe mit 21 Fällen an dritter Stelle der Häufigkeiten. Obwohl die Kaltlufttropfen alle aus dem isländisch-grönländischen Raum kommen, läßt sich eine Zuordnung zu einer bestimmten synoptischen Situation nicht so leicht wie bei den anderen Bahngruppen durchführen. Hier sind es im wesentlichen drei Lagen, die zur Begehung der NW-Richtung führen.

1. Ein nordatlantischer Hochkeil stößt einem von Island nach Südosten gerichteten Trog in die Flanke, so daß es meist schon über dem Nordmeer zu einer Abschnürung kommt. Dieser Fall zeigt Ähnlichkeit mit den Verhältnissen der KN-Bahngruppe; nur verlagert sich hier der Tropfen, die ursprüngliche Richtung des Troges beibehaltend, nach Südosten.

2. An der Südwestflanke eines Hochs über der Kolahalbinsel zieht ein Kaltlufttropfen nach Südosten. Hierbei handelt es sich meist um schwache Tropfen bei flacher Druckverteilung.

3. Ein Nord-Süd gerichteter Trog wandert von Island nach Osten, wobei er sich nach Süden ausweitet, so daß der in ihm abgeschnürte Tropfen eine aus beiden Komponenten zusammengesetzte Südostbewegung vollführt. Hierin zeigt sich schon eine enge Verwandtschaft zu der KW-Bahngruppe.

Da die Höhenströmung auf der Südwestseite der Tropfen fast immer eine Geschwindigkeit von mehr als 50, zuweilen sogar mehr als 100 Knoten im 500 mb-Niveau erreicht, ist der Verlauf der Einzelbahnen sehr viel gestreckter als bei den anderen Bahnen (Vgl. Abb. 115/116, S. 220). Der Geschwindigkeitskoeffizient liegt mit einem Wert von 1,95 an der Spitze aller Tropfenbahnen. Dies steht in Übereinstimmung mit Bahngruppe IX, die bei den Bodenbahnen ebenfalls die größte Geschwindigkeit aufwies. Auch über Mitteleuropa treten die größten Geschwindigkeiten der Kaltlufttropfen bei der Nordwestrichtung auf (Vgl. G.BAHRENBERG 1968, S. 141).

Die KNW-Bahngruppe gehört noch zu den winterlichen Bahngruppen, obwohl die Maxima im Dezember und Februar nicht mehr so stark ausgeprägt sind (Vgl. Diagr. 41).

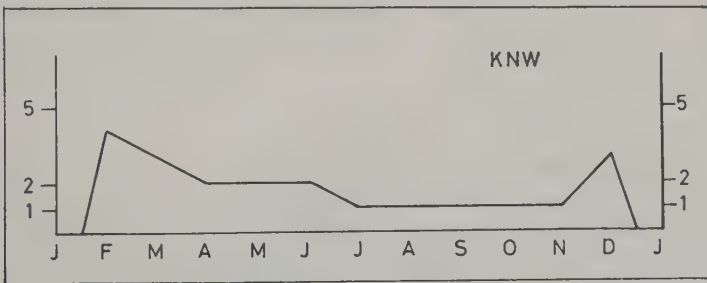


Diagramm 41 Jahresgang der KNW-Bahngruppe

Die Zahl der Fälle im Sommer ist im Verhältnis zur KN-Bahngruppe absolut und relativ gestiegen. Hierin deutet sich schon ein Übergang zur sommerlichen KW-Bahngruppe an.

In der Typenverteilung treten starke und intensive Tropfen nur je einmal auf. Obwohl zu den schwachen Tropfen auch wieder Tropfen bei flacher Druckverteilung hinzugekommen sind, liegt das Schwergewicht auf den Typen mittlerer Intensität. Mit dieser Verteilung unterscheidet sich die Bahn außer von den aberranten Kaltlufttropfen-Bahnen nur noch von der KW-Bahngruppe signifikant.

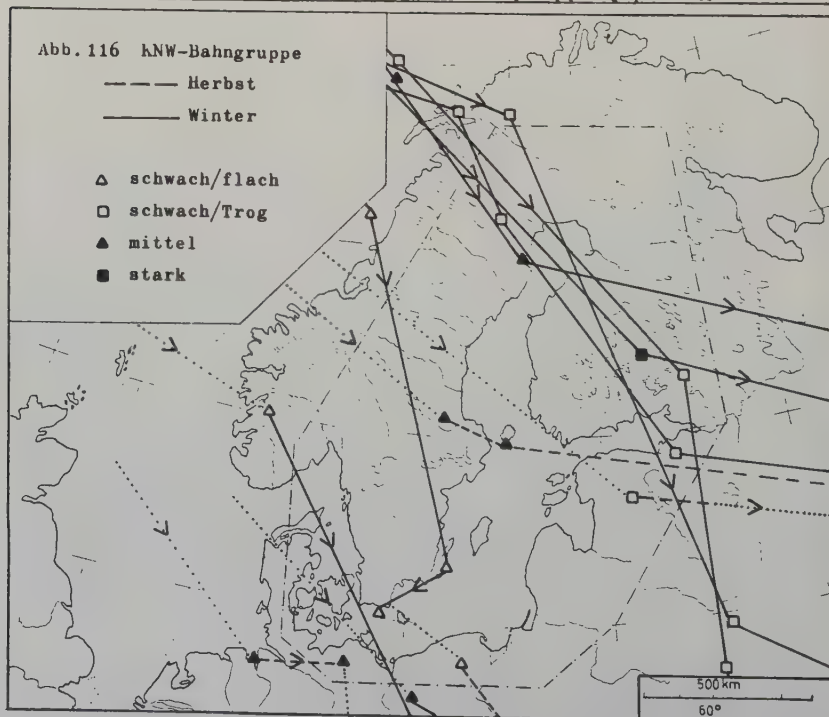
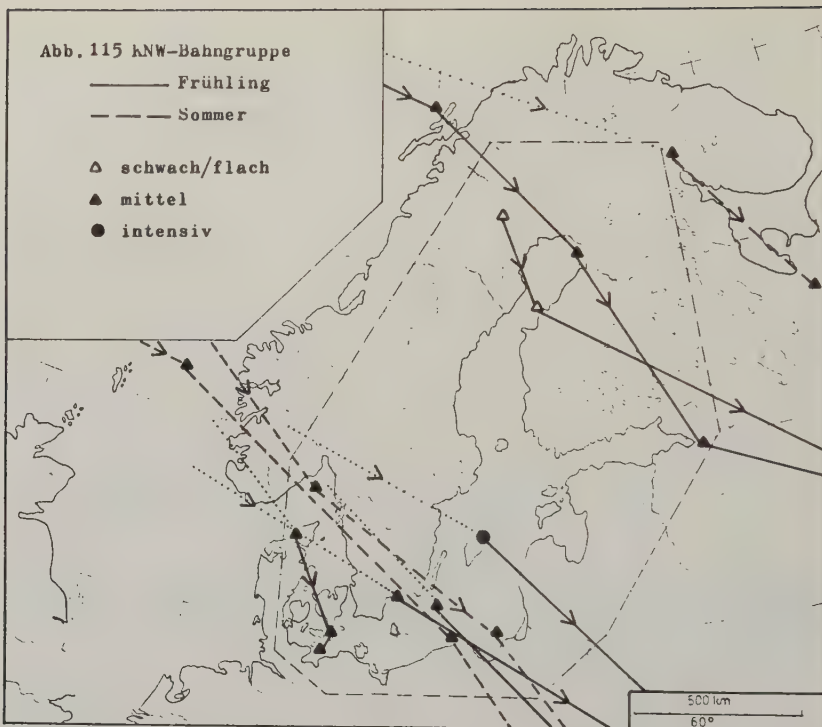


Tabelle 35 KNW-Bahngruppe

Tropfentypen	Frühling	Sommer	Herbst	Winter	Jahr
schwach/flach	1	-	1	2	4
schwach/Trog	-	-	1	3	4
mittel	4	3	2	2	11
stark	-	-	-	1	1
intensiv	1	-	-	-	1
Summe	6	3	4	8	21

In der räumlichen Anordnung der Einzelbahnen zeigt sich eine deutliche Zweiteilung (Vgl. Abb. 115/116, S. 220). Entsprechend der unterschiedlichen Kaltluftproduktion am Pol wird der südliche Bahnstreifen mehr im Frühjahr, der nördliche mehr im Winter frequentiert. Den Kaltlufttropfen auf beiden Bahnstreifen gemeinsam ist die im Verhältnis zu den bisher besprochenen Bahngruppen größere Neigung zu Niederschlägen und Bewölkung, da es sich hier um maritim-polare Luftmassen handelt. So werden im Frühjahr und Sommer die südlichen Küstengebiete von zum Teil heftigen Gewittern betroffen, so daß durch die mit ihnen verbundenen Schauer hohe Niederschlagssummen erreicht werden (60 mm in Berlin am 12. Juni 1966). Auch über Finnland besteht ab Mitte Mai eine größere Bereitschaft zu gewittrigen Schauern. - Im Herbst, wenn die Temperaturkontraste am ausgeglichensten sind, wird die Bodentemperatur zwar advektiv erniedrigt, aber erst im Ausstrahlungsstadium sinkt sie unter den Gefrierpunkt ab. Niederschläge sind jetzt selten; dafür tritt die Nebelbildung in den Vordergrund. Erst im Spätwinter, wenn sich die Bahnen über der Bottenwiek häufen, stellt sich auf der Vorderseite der Tropfen bei Lufruhe strengster Frost ein, während es auf der Rückseite zu Aufgleit-schneefällen kommt, die vermutlich auf Feuchtluftmassen aus dem Schwarzmeerraum zurückzuführen sein dürfte.

5. Die KW-Bahngruppe

Bei der KNW-Bahngruppe hatte sich eine Verschiebung des Jahreszeitenmaximums zum Sommer hin schon angedeutet, aber erst bei der Westrichtung fällt der Häufigkeitsgipfel in den Sommer (Vgl. Diag. 42, S. 222).

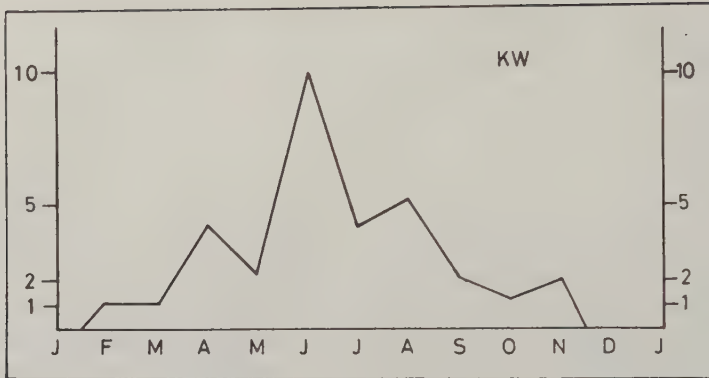


Diagramm 42 Jahresgang der KW-Bahngruppe

Die Bahngruppe stellt damit das Gegenstück zur winterlichen KO-Bahngruppe dar, denn während bei dieser 3/4 aller Fälle in den Monaten November bis März auftreten, kommen bei der Westrichtung 75 % aller Tropfen in den Monaten März bis Oktober vor, wobei der Monatsgipfel mit 10 Fällen im Juni liegt. Daß es sich bei der KW-Bahngruppe Nordeuropas nicht um eine isolierte Erscheinung handelt, sondern daß die West-Ost-Verlagerung von Kaltlufttropfen in einem breiten Streifen von den Lofot-Inseln bis nach Südfrankreich stattfindet, zeigt sich im Jahresgang der mitteleuropäischen KW-Bahn, die fast den gleichen Gang mit einem Maximum im Juni/Juli aufweist (Vgl. G.BAHRENBURG 1968, S. 159).

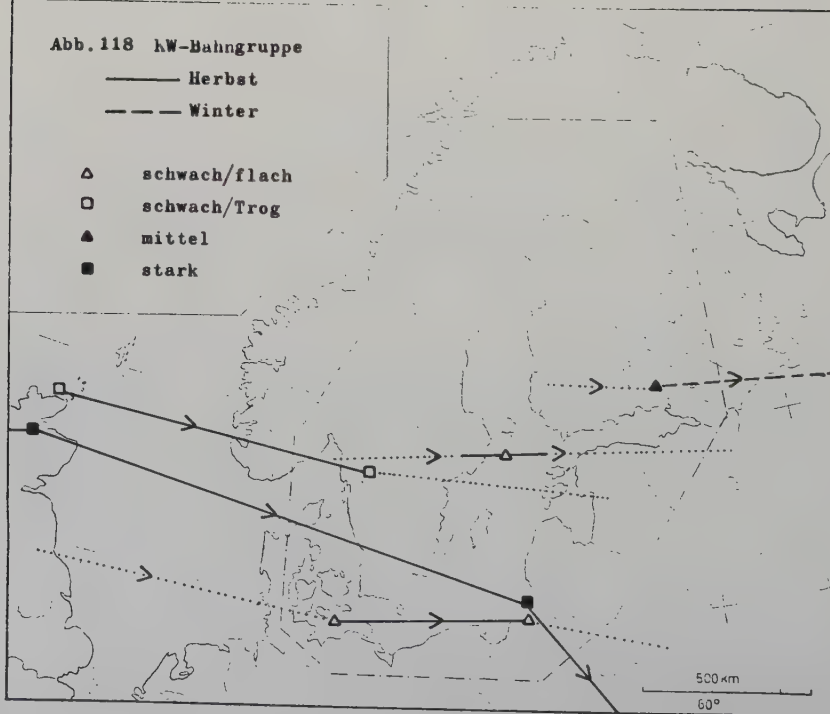
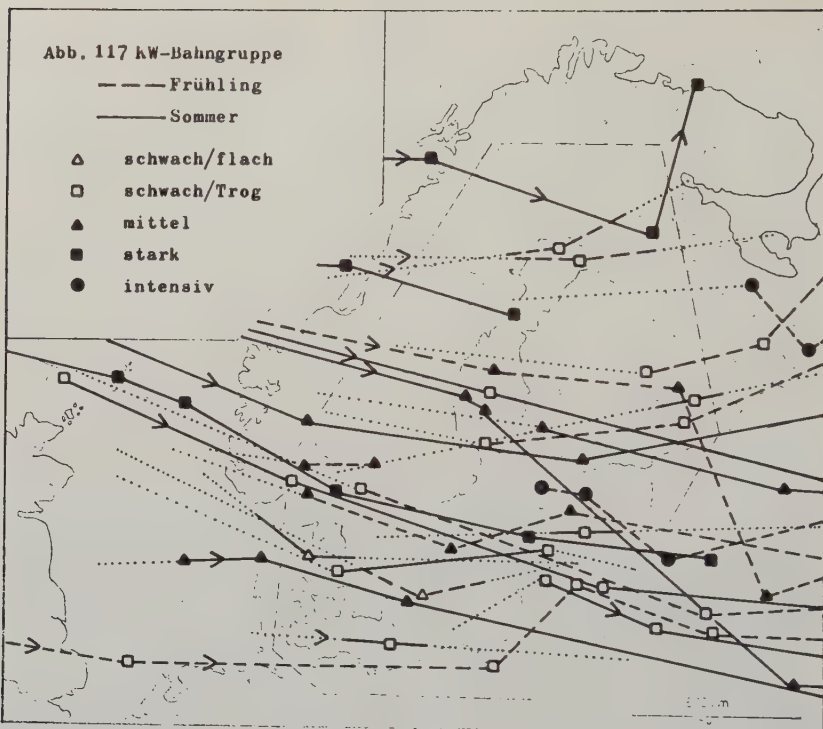
Für die gegen die Westwinddrift verlaufende Ostrichtung waren die starken und intensiven Tropfen typisch; bei der entgegengesetzten KW-Bahngruppe liegt der Schwerpunkt dagegen auf den schwachen Tropfen (Vgl. Tab. 36).

Tabelle 36 KW-Bahngruppe

Tropfentypen	Frühling	Sommer	Herbst	Winter	Jahr
schwach/flach	1	1	2	-	4
schwach/Trog	6	7	1	-	14
mittel	3	4	-	1	8
stark	-	3	1	-	4
intensiv	2	-	-	-	2
Summe	12	15	4	1	32

Daher ist der Unterschied in der Typenverteilung beim Vergleich in den Klassen a) schwach, b) mittel und c) Rest mit einem Wert von 11,02 auf dem 0,1-Niveau signifikant. Auch gegenüber der KNW-Bahngruppe zeigt sich außer zu der aberranten Bahn bei dieser Klasseneinteilung eine Signifikanz auf dem 5 %-Niveau.

Die Tropfen liegen in meridional ausgerichteten Höhenträgen, die durch nachfolgende atlantische Hochkeile allmählich nach Osten abgedrängt werden. Da der Vorstoß des hohen Drucks nicht so sehr nach Nordosten als vielmehr nach Norden gerichtet ist, kommt es in den Trögen nur zu einer geringen Abschnürung, die im Frühjahr fast immer erst über dem Ostseegebiet erfolgt. Wie die Abbildungen 117 und 118 (S. 224) zeigen, wird von der KW-Bahngruppe hauptsächlich der südliche und mittlere Ostseeraum beeinflusst. Da die Abschnürung der Tropfen nur geringe Ausmaße annimmt (Vgl. Tab. 36) und der Trog als Ganzes seine meridionale Erstreckung beibehält, sind Aufgleitniederschläge nicht typisch für diese Bahn. Bei ihr tritt der Einfluß der Tropfen vornehmlich durch Kälterückfälle und Schauerniederschläge in Erscheinung. Im Frühjahr sind die Auswirkungen noch relativ gering, aber im Sommer, wenn die Bahngruppe ihr Begehungsmaximum aufweist, ist die zyklonale Beeinflussung des Ostseeraumes beträchtlich. Da sich der Temperaturkontrast zwischen der kühlen Polarluft und der stark erhitzten Festlandsluft immer weiter vergrößert, nimmt die Konvektionsbereitschaft nicht nur temporal von Mai bis August, sondern auch räumlich von West nach Ost zu. So werden durch die Tropfen der KW-Bahngruppe die Baltischen Staaten und Polen von gewittrigen Schauern am häufigsten betroffen. - Den Einfluß der KW-Bahngruppe mit ihrem ausgeprägten Maximum im Juni kann man für Mitteleuropa als Beitrag zum "Sommermonsun" werten, der sich in einer "Temperaturverwerfung nach unten" (J.BLÜTHGEN 1966, S. 388) bemerkbar macht. Die im Gefolge der Kaltlufttropfen auftretende Abkühlung durch die Polarluft erreicht gelegentlich Beträge von 10 bis 15° im nördlichen Mitteleuropa. - Im Herbst und Winter, in denen die Tropfen nur durch geringe Niederschläge in Erscheinung treten, wird die Bahn selten begangen. Darin zeigt sich eine Sonderstellung gegenüber allen anderen Kaltlufttropfenbahnen.



6. Die KSW-Bahngruppe

Die Zahl der Tropfen, die aus Südwesten das Ostseegebiet erreichen, ist nur noch halb so groß wie die der westlichen Tropfen, aber nicht nur in der Anzahl, sondern auch in der Typenverteilung unterscheidet sich die KSW-Bahngruppe wesentlich von der zuletzt besprochenen Bahngruppe.

Tabelle 37 KSW-Bahngruppe

Tropfentypen	Frühling	Sommer	Herbst	Winter	Jahr
schwach/Trog	1	-	1	3	5
mittel	1	-	-	3	4
stark	1	2	1	2	6
intensiv	1	-	-	1	2
Summe	4	2	2	9	17

Beim Vergleich in den Klassen a) schwach und b) Rest ist der

χ^2 -Wert von 6,14 auf dem 5 %-Niveau signifikant. Während schwache Tropfen bei flacher Druckverteilung gar nicht auftreten, liegt das Schwergewicht auf den mittleren und starken Tropfen. Anders als bei der KW-Bahngruppe, bei der die Tropfen aus dem isländisch-grönländischen Raum kommen, schnüren sie sich hier im Gefolge eines stärkeren Kaltluftausbruchs über dem Nordmeer erst südlich des 60. Breitenkreises ab. Das Maximum ihres Auftretens liegt deshalb auch nicht im Sommer, sondern in der kalten Jahreszeit mit Häufigkeitsgipfeln im Januar/Februar und April (Vgl. Diag. 43)

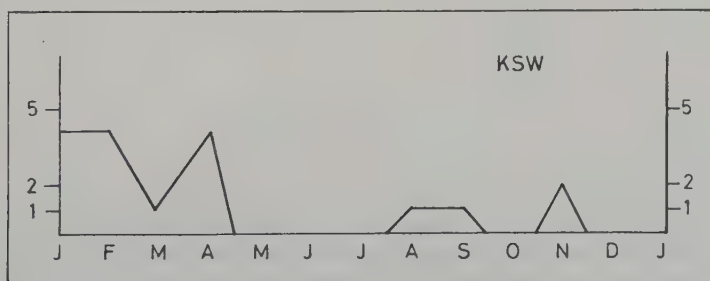


Diagramm 43 Jahresgang der KSW-Bahngruppe

Im Gegensatz zu den Tropfen der KN-Bahngruppe, die auch in Verbindung mit Ausbrüchen polarer Kaltluft entstehen und daher ihr

Maximum ebenfalls im Januar/Februar aufweisen, erfolgt hier aber kein korrespondierender Warmluftstrom von Osten her, sondern das blockierende Hoch über Rußland verbleibt in verhältnismäßig südlicher Lage, so daß der Trog unter Beibehaltung seiner meridionalen Erstreckung durch den nachfolgenden atlantischen Hochkeil nach Nordosten zurückgedrängt wird. Dabei erreichen die Tropfen oft erst in nördlicheren Breiten ihre maximale Intensität. "Dies zeigt, daß es sich bei Kaltlufttropfen nicht um fest abgeschlossene Kaltluftkörper handelt, sondern um dynamische Gebiete, die als Höhenwirbel von einer sich aus der Umgebung dauernd erneuernden Luftmasse durchströmt werden und die demzufolge ihre Mittel- oder Kerntemperatur entsprechend ändern, wenn sie auf ihrer Wanderung in erheblich kältere oder wärmere Gebiete geraten"

(W.BUSCHNER, Täglt. Wetterber. vom 26.2.1961). - Da bei den Tropfen eine asymmetrische Geschwindigkeitsverteilung mit der stärksten Strömung auf ihrer Südostseite vorherrschend ist, bewegen sie sich ziemlich geradlinig und schnell (Vgl. Abb. 119/120, S. 227). Mit einem GK von 1,70 steht die Bahn hinter der KNW-Bahn an zweiter Stelle.

Während sich im Sommer und Frühherbst der Durchgang der Tropfen vornehmlich in gewittrigen Schauern bemerkbar macht, stößt im Januar und Februar, wenn die Richtung ihren Häufigkeitsgipfel erreicht, extrem kalte Arktikluft in mehreren Staffeln auf der Rückseite der Tropfen nach Südosten vor. Da sich die Einzelbahnen in einem dichten Streifen von Dänemark bis Finnland konzentrieren, wird die südliche Ostseeküste von Deutschland bis zum Baltikum in jedem Fall von kräftigen Schneeschauern heimgesucht; der Kaltlufteinbruch wird anfangs aber noch durch die wärmere Ostsee positiv beeinflusst.

7. Die aberranten Kaltlufttropfenbahnen (KA)

Alle Kaltlufttropfen, die einen verwickelten, teilweise von Schleifen durchsetzten Bewegungsablauf aufweisen, wurden in der KA-Bahngruppe zusammengefaßt. Die komplizierten Steuerungsvorgänge, die zu diesen unregelmäßigen Einzelbahnen führen, sind von H.K.MEYER (1949) am Beispiel eines winterlichen Tropfens über Nordrußland ausführlich dargestellt worden. - In dieser Bahngruppe wurden aber nicht nur Tropfen mit verschlungenem Bewegungsablauf

Abb.119 KSW-Bahngruppe

— Frühling
- - - Sommer

□ schwach/Trog
▲ mittel
■ stark
● intensiv

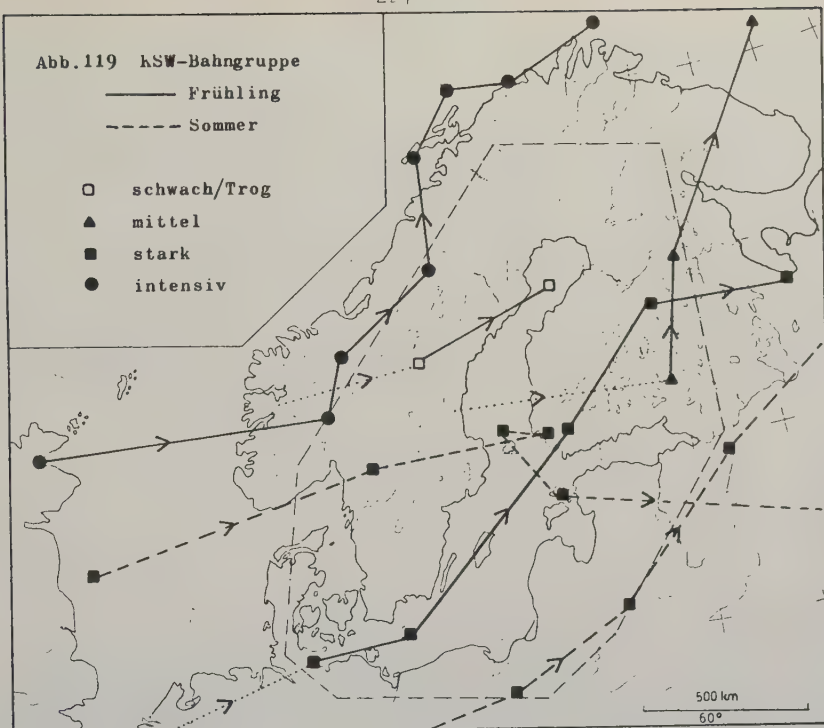
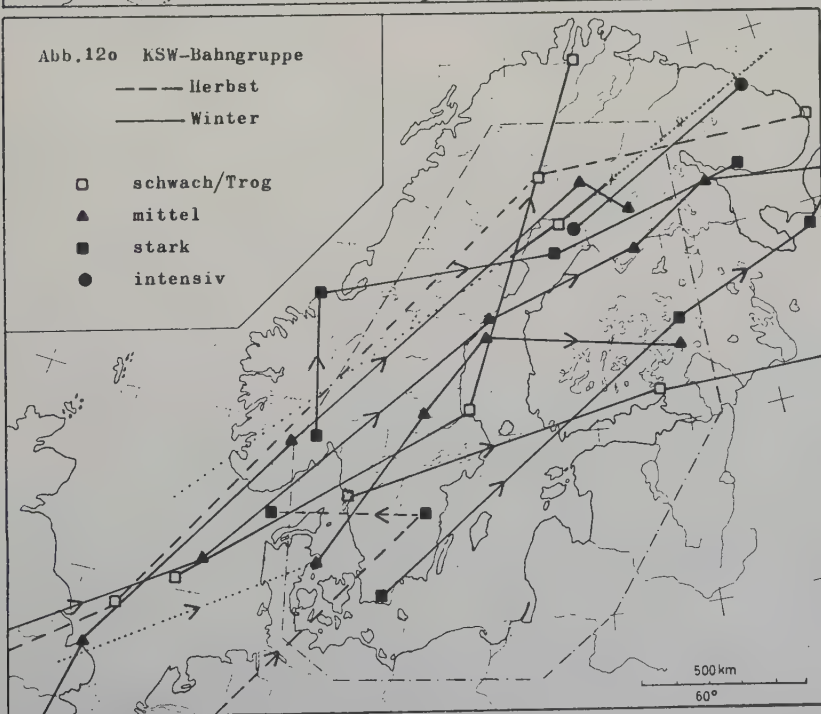


Abb.120 KSW-Bahngruppe

- - - Herbst
— Winter

□ schwach/Trog
▲ mittel
■ stark
● intensiv



aufgenommen, sondern auch solche, die mehrere Tage quasistationär über dem Ostseegebiet verharreten. Die maximale Verweildauer wurde dabei von einem sehr intensiven Tropfen im Februar/März 1958 erreicht, der 11 Tage lang das Ostseegebiet beeinflusste und für ganz Europa als Steuerungszentrum wirksam wurde.

Tabelle 38 Aberrante Kaltlufttropfenbahnen (KA)

Tropfentypen	Frühling	Sommer	Herbst	Winter	Jahr
mittel	4	-	-	2	6
stark	1	2	1	1	5
intensiv	1	2	1	3	7
Summe	6	4	2	6	18

Wie aus der Tabelle 38 zu ersehen ist, kommen schwache Tropfen nicht vor. Noch stärker als bei der intensiven KO-Bahngruppe liegt der Schwerpunkt hier auf den intensiven Höhenwirbeln, von denen der stärkste 8 geschlossene Isopotentialen aufweist. Infolge dieser Typenverteilung unterscheidet sich die KA-Bahngruppe von allen anderen Kaltlufttropfenbahnen mit einem χ^2 -Wert, der mindestens auf dem 1 %-Niveau signifikant ist. Auch hinsichtlich der Geschwindigkeit nimmt die KA-Bahngruppe eine Sonderstellung ein, denn der GK ist mit 1,22 der geringste von allen Bahngruppen. Eine schnelle Wanderung kommt überhaupt nicht und eine mittlere nur noch viermal vor.

Das Maximum der Aktivität liegt bei dieser Typenverteilung in der kälteren Hälfte des Jahres. Über 50% der Fälle treten zwischen Dezember und April auf, wobei der Häufigkeitssgipfel in den Februar fällt (Vgl. Diagram. 44).

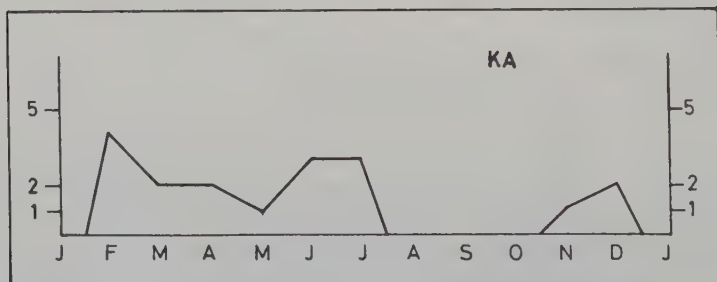


Diagramm 44 Jahresgang der KA-Bahngruppe

Da die Tropfen keine einheitliche Verlagerungsrichtung aufweisen (Vgl. Abb. 121-124, S. 230f), sondern häufig sogar quasistationär werden, kann man nicht von einer Vorder- und Rückseitenwitterung sprechen. "Dann kreisen nämlich Gebiete mit aufsteigender bzw. absteigender Luftbewegung im Kaltlufttropfen, und das Wetter eines Raumes hängt von seiner Lage in dem kreisenden System ab" (G.BAHRENBURG 1968, S. 148). Allgemein kann man feststellen, daß entsprechend der durchschnittlich größeren Intensität der Tropfen auch die Witterungserscheinungen (Aufgleitniederschläge, gewittrige Schauer und Temperaturrückgang) sehr viel ausgeprägter auftreten.

Abb. 121 KA-Bahngruppe
Frühling

- ▲ mittel
- stark
- intensiv

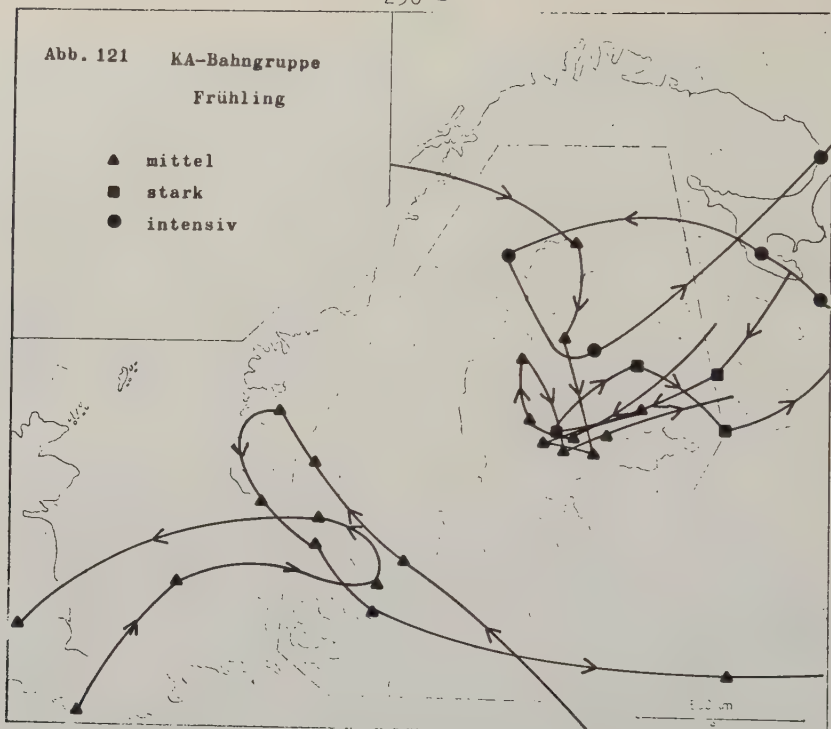


Abb. 122 KA-Bahngruppe
Sommer

- stark
- intensiv

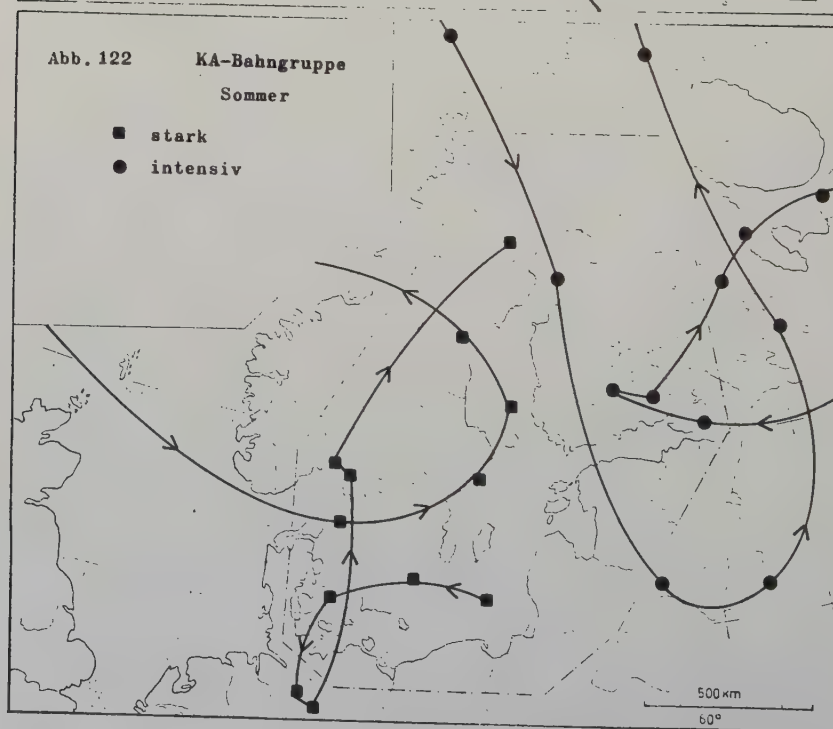


Abb. 123

KA-Bahngruppe

Herbst

- stark
- intensiv

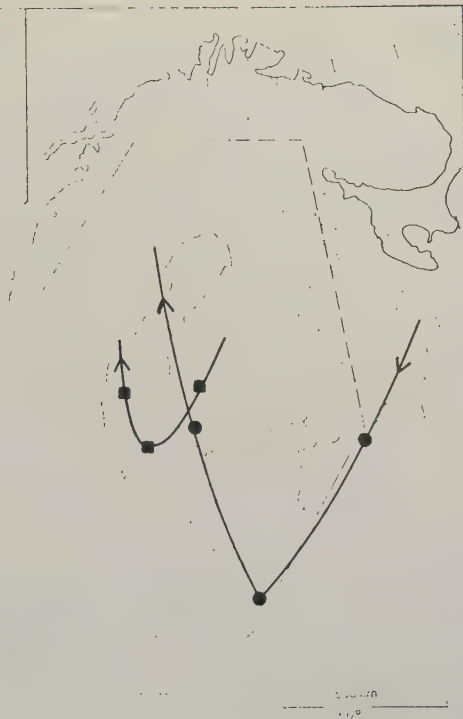


Abb. 124

KA-Bahngruppe

Winter

- ▲ mittel
- stark
- intensiv



III. Synthetischer Teil

Der Jahresgang der Zyklonalität

Nachdem die Charakteristika der drei großen Gruppen von Tiefdruckgebieten im Einzelnen besprochen worden sind, soll jetzt zusammenfassend eine zeitliche Synthese aller Einzelbeschreibungen versucht werden. An Hand der Werte für jeden einzelnen Monat wird in einem Diagramm das Zusammenspiel der verschiedenen Kräfte graphisch dargestellt, so daß sich aus dem Gesamtbild der ideale Jahresgang der Zyklonalität im Ostseeraum ergibt. Dabei muß allerdings einschränkend darauf hingewiesen werden, daß dieser auf einem zehnjährigen Material basierende Jahresgang in erster Linie für die Jahre 1957 bis 1966 zutrifft. Ob ihm über diesen Zeitraum hinaus auch eine allgemeine Gültigkeit zukommt, müßte erst an Hand eines umfangreicheren Materials geprüft werden.

Um in dem im Anhang beigegebenen Diagramm jeden Monat als eine geschlossene Einheit darstellen zu können, wurde von der bisher verwendeten Einteilung in die drei großen Gruppen etwas abgewichen und in erster Linie die Herkunftsrichtung in den einzelnen Abbildungen zu Grunde gelegt. Auf diese Weise ließen sich auch die gekrümmten Bewegungsrichtungen und die Kaltlufttropfenbahnen in eine Sektorendarstellung einordnen. Die aberranten Bahnen der Boden- und Höhentiefs dagegen wurden zusammen mit den quasistationären Bodenzyklonen zu den Lagetypen gerechnet, da für sie eine Differenzierung nach der Richtung nicht sinnvoll ist.

Wie die Zeichenerklärung (Vgl. Beilage oben rechts) zeigt, finden sich im inneren Kreis alle Lagetypen unter der angegebenen Signatur. Während der Kreisradius im angegebenen Maßstab die Gesamtzahl angibt, wird der relative Anteil der verschiedenen Tiefdrucktypen an dieser Zahl durch die Länge des dick ausgezogenen Kreisbogens ausgedrückt. An diesen Kreis schließen sich außen hin die Bahntypen in drei Ringen unterschiedlich schraffierter Sektoren an. Im ersten Ring (senkrechte Schraffur) finden sich, entsprechend ihrer Bewegungsrichtung, die gestreckten Bahngruppen I bis X, im zweiten (waagerechte Schraffur) entsprechend ihrer Herkunftsrichtung, die gekrümmten und retrograden Bahnen XI bis XVII und im dritten (Kreuzschraffur) die Kaltlufttropfenbahnen KSO bis KSW. Die Schenkellänge der äußeren Sektoren, gemessen vom Rand des inneren Kreises, gibt im angegebenen Maßstab die absolute

Zahl wieder, so daß durch einfache Addition der Strecken die Gesamtzahl der Tiefdruckgebiete einer bestimmten Richtung ermittelt werden kann. Die Kreisbögen begrenzen dabei die Richtungen, innerhalb derer die Einzelbahnen variieren.

Betrachten wir zunächst die Monatssummen der im Ostseegebiet aufgetretenen Tiefdruckgebiete (Vgl. Diagr. unten rechts). Der Verlauf der Kurve der Bahntypen (gestrichelt) zeigt, daß die Zahl der wandernden Zyklonen (ohne die Bahngruppen XVIII und KA) nur $\pm 15\%$ Abweichung ziemlich eng um den monatlichen Mittelwert von 95 Tiefs pendelt. Das Ostseegebiet wird also das ganze Jahr über ziemlich gleichmäßig von diesen Zyklonen beeinflusst. Ganz anders verhalten sich dagegen die Lagetypen, die nur in den Monaten Mai bis Juli nennenswerte Anteile erreichen. Die Abweichung vom jährlichen Mittelwert liegt deshalb mit $\pm 60\%$ sehr hoch. Setzt man bei diesen Tiefdruckgebieten voraus, daß sie einen Kerndruck von ≥ 1000 mb aufweisen, was bei der überwiegenden Zahl auch der Fall ist, dann kann man die Kurve der Lagetypen (gepunktet) mit der von W.DAMMANN (1960) für ganz Europa ermittelten monatlichen Häufigkeitsverteilung von Tiefdruckgebieten mit einem Kerndruck von ≥ 1000 mb vergleichen. Diese Kurve weist ebenfalls ein ausgeprägtes Maximum in der warmen Jahreszeit auf, wobei der Höchstwert allerdings wegen der im Ganzen südlicheren Lage des Untersuchungsraumes schon im Mai erreicht wird. Beide Kurven zeigen, daß sowohl im Ostseeraum als auch in ganz Europa der Erwärmung des Festlandes für das Auftreten von flachen Tiefdruckgebieten eine erhöhte Bedeutung zukommt. Auf Grund der Lagetypen weist die Gesamtzahl aller im Ostseeraum aufgetretenen Tiefdruckgebiete (durchgezogene Linie) mit 161 Fällen einen ausgeprägten Gipfel im Juni auf, während die beiden Minima im März und Oktober mit 94 bzw. 96 Fällen vorwiegend auf die Bahntypen zurückgehen.

In der nun folgenden Beschreibung der Zyklonalität in den einzelnen Monaten kann nur ein zusammenfassender Überblick über die herkunftsmäßige Verteilung und das Auftreten von Zyklonen gegeben werden. Auf die witterungsmäßigen Konsequenzen der verschiedenen Verteilungsspektren wird nur ganz allgemein eingegangen, da eine diesbezügliche ausführliche Beschreibung, wie in der Einleitung schon angeführt, einer weiteren, genauen Untersuchung bedarf.

In bezug auf die Herkunftsrichtungen der Zyklonen und damit auf die witterungsmäßige Beeinflussung gestalten sich die Verhältnisse des JANUAR recht wechselhaft, denn in der vergleichsweise

regelmäßigen Ausprägung des Sektorendiagramms zeigt sich, daß der Ostseeraum aus nahezu allen Richtungen beeinflusst wird. Allerdings weist keine häufiger frequentierten Richtungen ein Maximum auf, so daß der Januar mit 109 Fällen nur etwa 94 % des Monatsdurchschnitts erreicht. Nur bei den Lagetypen insgesamt stellt sich jetzt ein zweites Maximum ein, von dem 4/5 der Fälle zu gleichen Teilen auf die kurzfristig sichtbaren Frontaltiefs und auf die flachen Thermischen Tiefs entfällt. Letztere, die jetzt auch einen sekundären Gipfel aufweisen, bilden sich ausschließlich über der noch relativ warmen Ostsee und verursachen lokal begrenzte Schneeschauer. Bei den Kaltlufttropfen tritt neben der SW- und SO- besonders die N-Richtung stärker hervor. Die Tropfendurchgänge, die sich hier auf das nordfinnische Gebiet konzentrieren, haben wegen der Nähe der Arktis stets Frost im Gefolge, der sich unter Hochdruckeinfluß am Boden noch kräftig verschärfen kann. Auch die Tiefs der Bahngruppen IX und X (NNW und N) verfrachten maritime Polarluft arktischen Ursprungs in das Ostseegebiet, die besonders im südlichen Teil des Untersuchungsraumes die Temperaturen stärker absinken läßt. Zahlenmäßig am stärksten vertreten sind die Zyklonen der Richtung VIII (NW). Sie sind fast alle okkludiert, und hinter ihren Fronten führt die einströmende maritime Polarluft im südlichen Ostseeraum neben Schneefall zu mäßiger Erwärmung. Diese nimmt um so mehr zu, je mehr sich die Herkunftsrichtungen nach Südwesten verlagern. So zeichnen sich die Tiefs der Richtung IV (SW) neben Aufgleitniederschlägen vor allem durch kräftige Erwärmung aus, die sich südöstlich der Linie Skagerrak-Bottenkvarv mit kräftigen Südwestwinden von Norddeutschland bis nach Mittelfinnland hinein geltend machen kann. Während die südlichen Richtungen ein Frequenzminimum aufweisen, kommt den südöstlichen Richtungen eine Bedeutung hauptsächlich für die polnischen und baltischen Gebiete zu, da sie von den Aufgleitschneefällen dieser Zyklonen am meisten betroffen werden.

Im FEBRUAR zeigt sich ein Rückgang der südöst- bis westlichen Herkunftsrichtungen, während die Zahl der Zyklonen aus NW bis N stark zugenommen hat; dadurch steigt die Zahl der Fälle in diesem Monat auf 118 an und entspricht damit fast genau dem monatlichen Durchschnittswert. Die Herkunftsrichtungen VIII (NW), IX (NNW) und X (N) weisen jetzt alle ein deutlich ausgeprägtes Begehungsmaximum auf, und die Zahl der Tiefs aus diesen Richtungen wird

noch durch die Fälle der intensiven Bahngruppe XII (NW, auf W drehend) und durch die Kaltlufttropfen aus NW und N verstärkt. In der Konzentration auf diese in den meisten Fällen einen kräftigen Kaltluftausbruch im Gefolge habenden Zyklonenbahnen kann eine Erklärung für die in vielen Teilen des Ostseeraumes im Februar auftretenden thermischen Extremwerte gesehen werden. Bei der Kaltluft, die fast immer das gesamte Untersuchungsgebiet überschwemmt, handelt es sich anfangs meist um maritime Arktikluft aus Nordwest, die nach Durchzug der Zyklonen durch die Zufuhr trockener kontinentaler Arktikluft aus NO bis O abgelöst wird, in der bei kalten NO-Winden die Temperaturen am tiefsten absinken. Da es sich durchweg um kräftig ausgebildete Zyklonen handelt, erreichen die Windgeschwindigkeiten in der einbrechenden Kaltluft oft große Werte. In diesem Zusammenhang sei noch einmal an die beiden Sturmzyklonen vom 12.-14. und 16.-18. Februar 1962 erinnert, von denen die erstere mit 945 mb den absolut tiefsten Kerndruck im Ostseeraum aufwies und die für die Flutkatastrophe in Hamburg verantwortlich war. - Während die Tiefs der Richtungen IV und V (SW) milde Meeresluft in den südlichen Ostseeraum verfrachten, wirken die Kaltlufttropfen aus der gleichen Richtung in entgegengesetzter Weise, indem auf ihrer Rückseite ein Kaltluftstrom nach Süden in Bewegung gesetzt wird.

Der schon im Februar eingetretene Rückgang der südöst- bis westlichen Richtungen setzt sich im März noch fort. So weisen die Richtungen IV, V und VI (SW-WSW) jetzt nur noch eine minimale Frequenz auf, wodurch der Herantransport von warmer Meeresluft aus Südwest stark eingeschränkt wird. Auch die arktische Luftmassen heranbringenden nordwest- bis nördlichen Richtungen werden jetzt gegenüber dem Februar weniger häufig begangen, obwohl ihre Kaltlufteinbrüche für das Ostseegebiet noch immer bedeutsam sind. Das Schwergewicht verlagert sich vielmehr ganz einseitig auf die rein westliche Herkunftsrichtung, die, ebenso wie im Februar die ihr benachbarte NW-Richtung, jetzt 28 Fälle auf sich vereinigt. Die auf dem südlich des norwegischen Gebirges verlaufenden Bahnstreifen VII (W) sich bewegendenden Zyklonen führen im südlichen Ostseeraum im allgemeinen mit ihrer maritimen Polarluft zu Aufgleitniederschlägen und Erwärmung. Das gleiche gilt für die Tiefs der von W auf SSW abbiegenden Bahngruppe XIV, die die milde Meeresluft bis nach Mittelfinnland hinein verfrachten. Stärker ausge-

prägt hochreichende Zyklonen beider Richtungen verursachen dagegen zuweilen Rückseitenkaltluftausbrüche. Diese erfolgen bei den Tiefs auf dem nördlichen Bahnstreifen von VII (W) fast regelmäßig. Handelt es sich dabei um kräftig ausgeprägte Zyklonen, dann wird der NW-Kaltlufteinbruch bis ins Baltikum und Mittelrußland hinein spürbar. Diese Fälle sind aber nicht sehr häufig, so daß insgesamt der März, wie auch der asymmetrische Aufbau des Verteilungsspektrums zeigt, durch eine geringe Zahl von Luftmassenwechseln gekennzeichnet ist. Dies schlägt sich im Temperaturgang dadurch nieder, daß in diesem Monat die interdiurnen Temperaturänderungen sowohl der Luft- als auch der Wassertemperatur fast gleich Null sind (Vgl. W.WARMBT 1941, S. 76). - Insgesamt gesehen zeigt sich im März ein markanter Rückgang der wandernden Zyklonen (Vgl. Diagramm unten rechts), und da sich die Zahl der Lagetypen weiter verringert hat, weist die zyklonale Aktivität in diesem Monat mit nur 94 Fällen einen absoluten Tiefpunkt auf.

Bevor die Zahl der Lagetypen im Mai sprunghaft ansteigt, geht sie im APRIL auf ein Minimum zurück. Dagegen nimmt die Häufigkeit der wandernden Zyklonen wieder stark zu, so daß mit der Gesamtzahl von 119 Fällen wir im Februar fast genau der monatliche Durchschnittswert erreicht wird. Im Gegensatz zum Vormonat verteilen sich die Herkunftsrichtungen jetzt wieder über einen größeren Sektor, der zwischen SW und NW liegt. Zahlenmäßig ragt dabei die Richtung VIII (NW) heraus, deren südlich des norwegischen Gebirges verlaufende Zyklonen zuweilen noch im März mit ihrer maritimen Polarluft zu einer Erwärmung führen. Die nordöstlicher verlaufenden Tiefs dieser Richtung verursachen dagegen meistens Ausbrüche arktischer Kaltluft, die sich Anfang April von Norddeutschland bis zum Baltikum in einem scharfen Temperaturrückgang und in Schneeschauern bemerkbar macht. Dieselben Erscheinungen bedingen Kaltlufttropfen aus NW und N und die Herkunftsrichtungen IX (NNW) und X (N), wobei die Kaltluftstaffeln der letzteren Richtung allerdings nur westlich des 20. Längengrades nach Süden vorstoßen. Auch die Tiefs auf dem nördlichen Bahnstreifen von VII (W) sind noch alle für Rückseitenkaltluftausbrüche verantwortlich, während bei den Tiefs auf dem südlichen Bahnstreifen von VII und von Bahngruppe VI (WSW), die jetzt ein Begehungsmaximum aufweist, schon die Zufuhr von südwestlicher Warmluft überwiegt. Diese kann gerade von kräftigen Zyklonen der Richtung VI, deren Bahn über die freien

Flächen der Nord- und Ostsee führt, mit stürmischen Winden in das Ostseegebiet verfrachtet werden. Während die Kaltlufttropfen aus SW auf ihrer Rückseite noch arktische Luft nach Süden in Bewegung setzen, transportieren die Tiefs der anderen südwestlichen Bahngruppen (IV, V und XIII) milde Meeresluft heran. Diese kann, besonders beim südlicheren Bahnstreifen IV, beim Aufgleiten zwar noch zu Schneefällen vom Baltikum bis Finnland führen, aber die eigentliche Bedeutung der Zyklonen aus Südwest liegt in ihrem erwärmenden Einfluß, der allerdings hauptsächlich dem südöstlichen Untersuchungsraum zugute kommt. Denselben Effekt haben die Tiefs der Richtung II (S), die aber fast alle beim Übertritt auf das kältere Ostseewasser absterben, so daß die von ihnen herangeführte mittelmeeerische Warmluft nur noch von Polen bis Südfinnland wirksam wird.

Die schnell fortschreitende Erwärmung des Festlandes führt im MAI zu einem starken Anwachsen der quasistationären Bodenzyklonen. Von diesen weisen neben den Leetiefs auch die Frontaltiefs ein Maximum auf, wobei sich letztere fast ausschließlich auf kurzfristige Tiefbildungen an Kaltfronten konzentrieren. Obwohl die Zahl der wandernden Zyklonen gegenüber dem Vormonat etwas zurückgegangen ist, hat sich die Gesamtzahl auf Grund der vermehrt auftretenden Lagetypen stark vergrößert und liegt mit 133 Fällen rund 15 % über dem Monatsdurchschnitt. In der Verteilung der Richtungen tritt jetzt die SO-Richtung gegenüber dem April hervor. Die Zyklonen I und XVI - letztere weist jetzt ihr Maximum auf - führen russische Warmluft über das Baltikum bis nach Mittelfinnland, wo sie beim Aufgleiten auf die kühlere Meeresluft zu Niederschlägen führt. Diese können in Nordfinnland noch Mitte Mai als Schnee fallen. Bei den Tiefs von II (S) und III (SSW) ist dagegen schon die maritime Polarluft von Bedeutung, die auf ihrer Rückseite nach Osten vordringt und zu Schauern und Gewittern über den südöstlichen Teil des Ostseeraumes führt. Je weiter sich die Herkunftsrichtung von SW über W nach N verlagert, um so stärker macht sich die auf der Rückseite einströmende Meeresluft durch einen Temperaturrückgang und Schauer bemerkbar. Dabei führen die Tiefs der zahlenmäßig am stärksten vertretenen reinen Westrichtung die feuchte Meeresluft am weitesten nach Osten, so daß es über dem schon stark erwärmten Festland des südöstlichen Raumes zu heftigen Gewittern kommt. Den Tiefs der Richtungen IV (SW)

und besonders der reinen Nordrichtung X, die jetzt ein zweites Maximum aufweist, kommt zusammen mit den entsprechenden Kaltlufttropfen eine größere Bedeutung für den westlichen Teil des Ostseeraumes zu, da der von ihnen verursachte Ausbruch arktischer Kaltluft hauptsächlich über Schweden nach Süden führt und bis nach Mitteleuropa hinein wirksam wird, wo der sich im Ausstrahlungsstadium oft einstellende Bodenfrost große Schäden an der Vegetation hervorrufen kann.

Diese Kaltlufteinbrüche nehmen im JUNI an Zahl noch zu, wobei allerdings in der eingeflossenen Luftmasse die Temperaturen nur in sehr ungünstigen Lagen noch unter den Gefrierpunkt absinken. Die sie bedingenden Zyklonen kommen vornehmlich aus west- bis nordwestlichen Richtungen, von denen neben XII (NW, auf W abbiegend) auch die Kaltlufttropfen aus W jetzt ein Maximum aufweisen. In keinem anderen Monat wird der Ostseeraum so konzentriert aus diesen Richtungen beeinflusst. Die auf der Rückseite dieser Tiefs einströmende maritime Polarluft macht sich im gesamten mittleren und südlichen Ostseeraum durch einen kräftigen Temperaturrückgang bemerkbar, der in Norddeutschland zuweilen mit über 10° sein größtes Ausmaß erreicht. Verlaufen die Zugbahnen der Zyklonen sehr weit nördlich, so kann es sogar noch in diesem Monat im nordöstlichen Ostseeraum durch aus NO einfließende Arktikluft zu Schneeschauern kommen. Weiter südlich wird der Temperaturrückgang immer von z.T. heftigen Regenschauern und häufig von Gewittern begleitet. Von den anderen Richtungen, die gegenüber den west- bis nordwestlichen an Bedeutung zurücktreten, sind noch die Richtungen I (SO) und II (S) zu erwähnen, deren Tiefs auf ihrer Ostseite russische Warmluft ansaugen und nach Nordwesten transportieren, die beim Aufgleiten über der schwedischen Ostküste zu Niederschlägen führt. - Die Zahl der Lagetypen hat sich gegenüber dem Vormonat weiter vergrößert. Hieran haben die Thermischen Tiefs den größten Anteil, denn da im Juni die genetischen Voraussetzungen (Zufuhr kühler Luftmassen und starke Erhitzung des Festlandes) optimal gegeben sind, weist dieser Typ jetzt sein Maximum auf. Bei den Thermischen Tiefs kommt es über dem Festland auf eng begrenztem Raum häufiger zu Schauerniederschlägen und Gewittern. - Da jetzt neben den Bahn- auch die Lagetypen ein Maximum erreichen, liegt der Juni mit 161 Fällen an der Spitze aller Monate und übertragt den Durchschnittswert um 38 %.

Von Juni auf JULI erfolgt eine sehr ausgeprägte Umstellung in der Herkunftsrichtung der Zyklonen, denn während im Vormonat noch die west- bis nordwestlichen Richtungen einen absoluten Höchststand aufwiesen, fallen sie im Juli sehr abrupt auf ihr Minimum zurück. Dafür erreicht die gegenüber liegende Richtung I (SO) mit 14 Fällen jetzt ein ausgesprochen markantes Maximum. Die Zyklonenbahnen verteilen sich dabei über die gesamte Breite des Ostseeraumes, so daß die russische Warmluft, die von Tiefs aus SO herangeführt wird, das ganze Untersuchungsgebiet erfaßt. Dieser Luftmassentransport kann neben dem Fehlen der reinen Nordrichtung als Ursache dafür angesehen werden, daß in vielen Teilen des Ostseeraumes im Juli die Temperaturen ihren höchsten Stand erreichen. - An zweiter Stelle hinter der SO- stehen in diesem Monat die SW-Richtungen, die allerdings noch nicht die maximalen Häufigkeiten des August erreichen. Die Zyklonen von IV und V (SW) bringen auf ihrer Rückseite feucht-kühle Meeresluft in den südlichen und mittleren Ostseeraum, während die Tiefs der Bahngruppe XIII (SW, auf SO abbiegend), die jetzt ihr Begehungsmaximum aufweist, diese Luftmassen bis nach Lappland herumholen. In dieser Meeresluft kommt es über dem erhitzten Festland zu zahlreichen Gewitterschauern, so daß in Süd- und Mittelschweden die Niederschlagsmengen nach dem August jetzt den zweithöchsten Wert erreichen. Auch die Zyklonen und Kaltlufttropfen der reinen Westrichtung, die zahlenmäßig an dritter Stelle steht, führen mit ihrer maritimen Polarluft zu häufigen Schauern. - Bei den Lagetypen sind immer noch die Thermischen Tiefs sehr stark vertreten, obwohl ihre Zahl nach dem Junigipfel schon zurückgegangen ist, da die einströmende Polarluft nicht mehr so kalt ist. - Insgesamt gesehen weist der Juli mit 135 Fällen fast die gleiche Zyklonenhäufigkeit wie der Mai auf.

Von Juli auf AUGUST erfolgt abermals eine markante Umstellung in der Herkunftsrichtung, indem die im Juli an zweiter Stelle stehende SW-Richtung jetzt deutlich hervortritt, da sowohl die Richtung IV als auch V jetzt ihr Monatsmaximum aufweisen. Verstärkt durch die Fälle von XIII (SW auf SO abbiegend) bringen die oft schon okkludierten Zyklonen wie im Juli auf ihrer Rückseite maritime Polarluft in das Ostseegebiet, die im südlichen Teil zu heftigen Schauerniederschlägen und größerer Abkühlung führt. Auch jetzt wieder wird diese Wirkung durch die Tiefs der zahlenmäßig an zweiter Stelle stehenden reinen Westrichtung verstärkt. Da hier sowohl die Boden- als auch die Höhenzyklonen nur südlich des norwegischen

Gebirges nach Osten ziehen, konzentrieren sich die Abkühlung und Schauer bedingenden polaren Luftmassen vornehmlich auf den südlichen Teil des Ostseeraumes. Der östliche Rand des Untersuchungsgebietes wird darüberhinaus auch noch von den Auswirkungen der von Süden nach Norden ziehenden Tiefs der Richtung II betroffen. Diese Zyklonen, die jetzt ihr Häufigkeitsmaximum erreichen, führen auf ihrer Ostseite feuchte Meeresluft aus dem Schwarzmeerraum nach Norden, die beim Aufgleiten auf die kühlere Polarluft zu verbreiteten Niederschlägen führt. Im Zusammenwirken dieser eben erwähnten drei Hauptherkunftsrichtungen SW, W und S kann die Ursache dafür gesehen werden, daß der August im Ostseeraum der regenreichste Monat ist. - Da die Zahl der Lagetypen, bei denen immer noch die Thermischen Tiefs dominieren, stark zurückgegangen ist, liegt die Gesamtzahl aller Tiefs mit 124 Fällen nur noch 7 % über dem Monatsdurchschnitt.

Im SEPTEMBER erfolgt wieder eine deutliche Umstellung, indem jetzt wieder die west- bis nordwestlichen Richtungen dominierend sind. Zwar weist in diesem Monat die Bahngruppe III (SSW) ihr Maximum auf, aber da es sich nur um 7 Fälle handelt, erlangt diese Herkunftsrichtung, deren Tiefs feuchte Subtropikluft in den östlichen Ostseeraum transportieren, keine große Bedeutung. Auch Bahngruppe XI (WSW, auf SW abbiegend), deren nach Nordosten abbiegende Tiefs maritime Polarluft um die Südspitze des Gebirges bis nach Nordfinnland verfrachten, fällt mit 6 Fällen nicht stark ins Gewicht, obwohl auch sie das Monatsmaximum darstellen. Demgegenüber wird der September vornehmlich von Zyklonen aus west- bis nordwestlicher Herkunftsrichtung beherrscht. Da sich das Festland in diesem Monat stärker auszukühlen beginnt, führt die maritime Polarluft nur noch vereinzelt zu Schauern und Gewittern. Auch die advektive Abkühlung tritt jetzt zurück; dagegen kommt es in Inner-schweden bei Aufheiterung hinter den Skanden schon zu den ersten Strahlungsfrösten. Auch die ersten Schneefälle stellen sich jetzt schon in Lappland ein, wenn die Strömung hinter einer nördlich ziehenden Zyklone auf Nordost dreht. - Insgesamt wird der September vornehmlich von einer Herkunftsrichtung beherrscht, so daß die täglichen Temperaturschwankungen von Luft und Wasser wegen der geringen Anzahl von Luftmassenwechseln im südlichen Ostseeraum sehr klein ist (Vgl. W.WARMBT 1941, S. 76). - Die Zahl der Thermischen Tiefs ist gegenüber dem August fast gleich geblieben, aber da sich die Typenvielfalt verringert hat, machen sie fast $\frac{3}{4}$

aller Lagetypen aus. - Die Gesamtzahl liegt mit 100 Fällen beträchtlich unter dem Monatsdurchschnitt.

Im OKTOBER erreicht die Gesamtzahl mit nur 96 Fällen ein zweites Minimum und liegt damit 18 % unter dem Monatsdurchschnitt. Dies ist dadurch bedingt, daß die Bahngruppen XIII bis XVI überhaupt nicht auftreten und daß keine der restlichen jetzt ein Maximum aufweist. Auch die Kaltlufttropfen verteilen sich nur auf drei Herkunftsrichtungen, so daß dieser Monat mit nur 18 von 28 möglichen Bahn- und Lagetypen die geringste Typenvielfalt aufweist. Vielleicht ist die Ursache für diese Erscheinungen in dem verstärkten Auftreten von kontinentalen Hochdruckgebieten in diesem Monat zu sehen. - Beherrscht wird der Oktober vornehmlich von Zyklonen aus nordwestlicher Richtung, Während auf ihrer Vorderseite aus der zumeist schon abgehobenen maritimen Polarluft verbreitet Niederschläge fallen, erfolgt auf der Rückseite in der Regel schon ein kräftiger Kaltlufteinbruch. Die mit stürmischen Winden aus NW bis N einströmende Arktikluft führt besonders über der noch warmen Ostsee zu kräftigen Schneeschauern. Durch die Zyklonen der Bahngruppe IX (NNW) wird auch schon kontinental-arktische Luft aus NO in das Ostseegebiet gesteuert, in der es über der Bottensee zur Bildung von Thermischen Tiefs kommt. Eine Erwärmung wird vor allem durch die Tiefs aus SW in den Ostseeraum getragen. Dabei ist es hauptsächlich die zahlenmäßig herausragende Richtung IV, deren okkludierte Zyklonen milde Meeresluft bis nach Mittelfinnland hinauf verfrachten. Diese, wie auch die Tiefs der Richtungen II (S) und III (SSW), hinter denen herumgeholte maritime Polarluft gleichfalls nach Nordosten transportiert wird, sind für verbreitete Aufgleitniederschläge im südlichen und mittleren Ostseeraum verantwortlich.

Das Verteilungsbild der Herkunftsrichtungen im Oktober verändert sich nicht wesentlich im NOVEMBER. Abgesehen davon, daß die Kaltlufteinbrüche mit fortschreitender Jahreszeit immer tiefere Temperaturen aufweisen, ähnelt die witterungsmäßige Beeinflussung der des Oktobers. Bemerkenswert ist, daß die Aktivität der Kaltlufttropfen, die von Juli bis Oktober zurückgetreten war, jetzt wieder sprunghaft zunimmt, denn im November sind wieder alle sieben Herkunftsrichtungen vertreten. Dabei weisen die Tropfen aus östlichen Richtungen jetzt ihr Frequenzmaximum auf. Da sie sich alle südlich des 60. Breitenkreises nach Westen bewegen, werden von ihrer kalten Ostströmung besonders die südlichen Küstenstaaten

betroffen. Hier kommt es zu heftigen Schneefällen, wenn maritime Polarluft aus Südwesten auf die kalte Kontinentalluft aufgleitet. - Da die Lagetypen im November ihr Minimum aufweisen, was vornehmlich auf die geringe Zahl der Thermischen Tiefs zurückgeht, liegt die Gesamtzahl mit 102 Fällen noch beträchtlich unter dem Monatsdurchschnitt.

Obwohl die Gesamtzahl der Tiefs mit 111 Fällen im DEZEMBER etwas zugenommen hat, weist auch dieser Monat ein unterdurchschnittliches Auftreten von Zyklonen auf. Der Schwerpunkt in der herkunftsmäßigen Verteilung liegt auf der Bahngruppe VII (W), deren Tiefs den mittleren und südlichen Ostseeraum mit feuchter Meeresluft erwärmend beeinflussen. Verläuft die Zugbahn südlich des norwegischen Gebirges, dann wird die schon über Innerschweden gebildete Kaltluft auf der Rückseite nach Süden geführt, wo sie als Kaltlufteinbruch die Temperaturen von Norddeutschland bis Polen absinken läßt. Einen wesentlich stärkeren Kaltlufteinbruch bedingen dagegen die Bahngruppen VIII (NW) und besonders XII (NW auf W abbiegend), die jetzt ein zweites Maximum aufweist. Für beide sind jetzt kräftig entwickelte Zyklonen typisch, hinter denen es in der einbrechenden Arktikluft zu Schaden bringenden Windstärken kommen kann. Die Kaltlufteinbrüche hinter Tiefs der Richtung IX (NNW) sind besonders für Lappland bedeutsam, da sie zuweilen "maskiert" eine Erwärmung bewirken, wenn sich dort vorher unter Hochdruckeinfluß autochthone Strahlungskaltluft mit sehr viel tieferen Temperaturen gebildet hatte. Eine stärkere Erwärmung geht nur von den Tiefs aus SW aus. Hier ist es wie im November die Bahngruppe V, deren Zyklonen jetzt aber alle südlich des norwegischen Gebirges verlaufen, so daß nur der südliche Ostseeraum bis nach Finnland von der milden Meeresluft erfaßt wird. Hier kommt es zu Regen und Tauwetter, während sich nordwestlich der Linie Oslo-Vaasa bei nord- bis nordöstlichen Winden verbreitete Schneefälle einstellen.

Überschauen wir jetzt noch einmal alle Verteilungsspektren, dann läßt sich zusammenfassend sagen, daß sich die Masse der das Ostseegebiet durchquerenden Zyklonen auf die west- bis nordwestlichen Herkunftsrichtungen konzentriert, denn diese sind in 10 Monaten des Jahres dominant vertreten. Nur im Juli und August wird diese Vorherrschaft abgelöst durch Zyklonen südwest- bzw. südöstlicher Herkunft, die dann das Verteilungsbild bestimmen.

IV. Schluß

In der vorliegenden Arbeit ist der Versuch unternommen worden, einen Beitrag zur regionalen Klimageographie Nordeuropas zu leisten, indem für den Zentralraum dieses Gebietes ein Teil der barischen Druckgebilde, nämlich die Tiefdruckgebiete im Boden- und Höhenruckfeld, einer eingehenden Untersuchung unterzogen wurden. Nach einer Definition der vorkommenden Tiefdrucktypen wurde ein Bild ihres Verhaltens hinsichtlich der Bewegungsrichtung, der Verlagerungsgeschwindigkeit, der Intensität, der Neubildungs- und Auffüllungsgebiete, der Vertiefungs- und Verflachungsgebiete sowie der jahreszeitlichen und räumlichen Verteilung gegeben. Zusammenfassend wurde dann im synthetischen Teil der Jahresgang der Zyklonalität an Hand von monatlichen Werten in einem Gesamtdiagramm dargestellt und auf die witterungsmäßigen Auswirkungen dieser Konstellationen kurz eingegangen, so daß das Wechselspiel der verschiedenen zyklonalen Beeinflussungen des Ostseeraumes deutlich wurde.

Als Nebenprodukt ergab sich dabei eine Neubearbeitung der Zyklonenzugbahnen über Nordeuropa, die entsprechend ihrer Richtung zu Bahngruppen zusammengefaßt wurden. Diese weichen erheblich von den auf älteren Mittelwerten aufbauenden Zugstraßen der barometrischen Minima von W. KÖPPEN und J.v.BEBBER ab, da bei ihnen die vertikale und horizontale Struktur der Tiefdruckgebiete berücksichtigt wurde. Diese dreidimensionale Betrachtungsweise muß heutzutage aber als unerläßlich angesehen werden, wenn man ein unzutreffendes Bild, das durch die Verknüpfung kausal nicht zusammengehöriger Häufigkeitszentren entsteht, vermeiden will. Wie die Untersuchung gezeigt hat, sind die tatsächlichen Bewegungen der Zyklonen sehr viel vielgestaltiger als es das Bild der alten Bahnkarten suggeriert. Insofern erschien auch eine erneute Diskussion der Zyklonenzugbahnen dringend geboten.

Auf das Problem der natürlichen Jahreszeitengliederung wurde bewußt nicht eingegangen, denn wenn ein starrer Schematismus vermieden werden soll, müssen sich die Jahreszeiten vornehmlich an den Witterungsregelfällen orientieren. Abgesehen davon, daß an den Regularitäten aber auch die Hochdruckgebiete, die hier nicht untersucht wurden, in gleicher Weise beteiligt sind, ist der vorliegende Untersuchungszeitraum von 10 Jahren für eine Ableitung solcher Regelhaftigkeiten zu kurz.

V. Literaturverzeichnis

A. Amtliche Veröffentlichungen

AVIATION METEOROLOGICAL REPORTS, issued by Meteorological Office, Air Ministry, London.

M.O.M. 365/6 Meteorological report on Poland and east Prussia, 1939.

M.O.M. 365/7 Meteorological report on northern Germany, 1939.

M.O.M. 365/8 Meteorological report on southern Scandinavia and Denmark, 1943².

M.O.M. 365/22 Meteorological report on Arctic Scandinavia, 1944.

MONATLICHER WITTERUNGSBERICHT des Deutschen Wetterdienstes, Frankfurt, 1957 - 1966.

TÄGLICHER WETTERBERICHT des Deutschen Wetterdienstes, Frankfurt, 1957 - 1966.

WETTERKARTE DES SEEWETTERAMTES HAMBURG, Hamburg, 1957 - 1966.

ÅRSBOK, Sveriges Meteorologiska och Hydrologiska Institut, Stockholm, 1957 - 1966.

B. Individuelle Veröffentlichungen

ANGERO, J.M. Das Auftreten von stationären Hoch- und Tiefdruckgebieten in Nord- und Mitteleuropa 1925 - 1939. Terra 60, 1. 1948, S. 1-6.

ÅNGSTRÖM, A. Sveriges Klimat. Stockholm, 1958. 155 S.

BAHRENBERG, G. Auftreten und Zugrichtung von Tiefdruckgebieten in Mitteleuropa. Diss. Münster, 1968. Manuskript 179 S.

BARG, B. Ein Beitrag zur Frage des orographischen Einflusses des südnorwegischen Berglandes auf zyklogenetische Vorgänge und allgemein auf das Bodendruckfeld im Skagerrak. Studia geophys. et geodaetica, 3. Praha, 1959. S. 82 - 91.

- BEBBER, J.v. Die geographische Vertheilung und Bewegung, das Entstehen und Verschwinden der barometrischen Minima in den Jahren 1876 bis 1880. Zeitschr. d. Österreichischen Gesellsch. f. Meteor. 16, 1881. S. 414 - 419.
- . Die Zugstraßen der barometrischen Minima nach Bahnkarten der Deutschen Seewarte für den Zeitraum 1875 bis 1890. Meteor. Zeitschr. 8, 1891, S. 361 - 366.
- . Häufigkeit und Tiefe der barometrischen Minima sowie die Bahnen der Maxima und stationären Maxima in dem Zeitraum vom Winter 1883/84 bis Ende Herbst 1887. Ann. d. Hydr. u. mar. Meteor. 22, 1894. S. 208 - 218.
- und W. KÖPPEN. Die Isobarentypen des Nordatlantischen Ozeans und Westeuropas, ihre Beziehung zur Lage und Bewegung der barometrischen Maxima und Minima. Aus d. Archiv d. Dt. Seewarte 18, Nr. 4. 1895. 27 S.
- BECKER. Zwei Nordsee-Orkane in einer Woche. Wetterkarte des Seewetteramtes Hamburg. Jg. 10, Nr. 59 und 60. 1962.
- BERGERON, T. The Problem of Artificial Control of Rainfall on the Globe. II. The Coastal Orographic Maxima of Precipitation in Autumn and Winter. Tellus, Vol. I, Nr. 3, 1949. S. 15 - 32.
- und G. SWOBODA. Wellen und Wirbel an einer quasi-stationären Grenzfläche über Europa. Veröff. d. Geophys. Inst. Leipzig. Bd. 3, H. 2, 1924. S. 63 - 170.
- BJERKNES, J. On the structure of moving cyclones. Geofys. Publ. Vol I, Nr. 2. Oslo, 1919, 8 S.
- und H. SOLBERG. Life cycle of cyclones and polar front theory of atmospheric circulation. Geofys. Publ. Vol. III, Nr. 1, 1922. 18 S.
- BLÜTHGEN, J. Geographie der winterlichen Kaltlufteinbrüche in Europa. Archiv d. Dt. Seewarte 60, Nr. 6/7, 1940. 182 S.
- . Kaltlufteinbrüche im Winter des atlantischen Europa. Geogr. Zeitschr. 48, 1942, S. 21 - 46.
- . Der Winter in Nordeuropa. Petermanns Geogr. Mitt. 92, 1948. S. 113 - 133.
- . Synoptische Klimageographie. Geogr. Zeitschr. 53, 1965. S. 10 - 51.
- . Allgemeine Klimageographie. Berlin, 1966². 720 S.

- BÜHNECKE, G. und G. DIETRICH. Monatskarten der Oberflächentemperatur für die Nord- und Ostsee und die angrenzenden Gewässer. Dt. Hydr. Inst. Hamburg, 1951. 17 Blätter.
- BRADKA, J. Der Jahresverlauf der zyklonalen und antizyklonalen Aktivität auf der Nordhalbkugel. *Studia geophys. et geodaet.* 1, 1957. S. 342 - 360.
- . Natural Seasons on the Northern Hemisphere. *Geophys. Sbornik*. Bd. 14, Nr. 262, 1966. S. 597 - 648.
- BRAUN, G. Das Ostseegebiet. *Aus Natur und Geisteswelt*. 367. Bändchen. Leipzig, 1912. 108 S.
- BUHLMANN, K. Das Nordseesturmtief vom 17. bis 21. Oktober 1961. *Meteor. Abh. Fr. Univers. Berlin*, Bd. 75, 1968. 89 S.
- BUSCHNER, W. Untersuchung über Verlagerung, Aufbau und Dynamik zweier winterlicher Kaltlufttropfen. *Diss. Leipzig*, 1950 und *Ber. d. Dt. Wetterd. US-Zone*, Nr. 23, 1951. 30 S.
- CHROMCW, S.P., N. KONCEK und G. SWOBODA. Einführung in die synoptische Wetteranalyse. *Wien*, 1940. 532 S.
- DAMMANN, W. Klimatologie der Tiefdruckgebiete und Fronten. *Ann. d. Meteor.* 5, 1952, S. 395 - 402.
- . Klimatologie der atmosphärischen Störungen über Europa. *Erdkunde*, 14. 1960. S. 204 - 221.
- ERIKSEN, W. Zur Klimageographie der Fronten über Europa. *Verhandl. d. 37. Dt. Geographentages Kiel 1969, Wiesbaden*, 1970. S. 139 - 146.
- ERIKSSON, B. Sannolikhetsfördelningar av temperatur, nederbörd och vind vid olika väderlekstyper. *Not. prelim. Rapp. Sverig. Meteor. o. Hydr. Inst. Ser. Meteor.* Nr. 14, 1967. 58 S.
- EVJEN, S. Beitrag zur Kenntnis der barometrischen Unruhe. *Meteor. Zeitschr.* 46, 1930. S. 107 - 113.
- . Über die Vertiefung von Zyklonen. *Meteor. Zeitschr.* 53, 1936. S. 165 - 172.
- . Number and direction of cyclones passing Norway and the Norwegian Sea. *Meteor. Annaler* Vol. 3, Nr. 9, 1953. S. 225 - 255.
- . Number of cyclones and anticyclones in Northwest and Middle Europe. *Meteor. Annaler* Vol. 3, Nr. 16, 1954. S. 469 - 485.

- FLIRI, F. Synoptische Klimadiagramme. Die Erde 96, 1965.
S. 122 - 135.
- FLOHN, H. Witterung und Klima in Mitteleuropa. Forsch. z. dt.
Landeskunde 78, 1954². 214 S.
- und J. HUTTARY. Über die Bedeutung der Vb-Wetterlagen
für das Niederschlagsregime Mitteleuropas. Meteor. Rundsch.
3, 1950. S. 167 - 170.
- HANKIMO, J. Some computations of the Energy Exchange between
the Sea and the Atmosphere in the Baltic Area. Finn.
Meteor. Off. Contributions 57, Helsinki, 1964. 26 S.
- HANN, J.v. Handbuch der Klimatologie. Wien, 1883. 764 S.
- und R. SÜRING. Lehrbuch der Meteorologie. Leipzig,
1939⁵. 480 S.
- HESS, P. und H. BREZCWSKY. Katalog der Großwetterlagen Europas.
Offenbach, 1969². 70 S.
- HOILMANN, G. Über Verlagerung und Wetterwirksamkeit von Kaltluft-
tropfen. Zeitschr. f. Meteor. 6, 1952. S. 8 - 15.
- JOHN, H. Über den Aufbau und die Entwicklung von Kaltlufttropfen.
Veröff. d. Geophys. Inst. Leipzig 16, 2. Serie, 1953.
S. 215 - 315.
- KEIL, K. Handwörterbuch der Meteorologie. Frankfurt, 1950. 604 S.
- KLEIN, W.H. Principal tracks and mean frequencies of cyclones and
anticyclones in the Northern Hemisphere. US. Weather Bur.
Res. Pap. 40, 1957. 22 S.
- KLEINSCHMIDT, E. Über Aufbau und Entstehung von Zyklonen.
Meteor. Rundsch. 3, 1950. S. 1 - 5 und 54 - 61.
- KLUG, W. Der Mechanismus der Steuerung von hochreichenden Zyklo-
nen. Meteor. Abh. FU Berlin 3, H.2, 1956. 42 S.
- KNOCH, K. Zur Methodik klimatologischer Forschung. Tätigkeitsber.
d. Preuß. Meteor. Inst. für 1924. S. 509 - 559.
- KOHNKE, D. Die starken Niederschläge am 27. September 1965 in
Nordwestdeutschland. Wetterkarte des Seewetteramtes Ham-
burg, Jg. 13, Nr. 276, 1965.
- KÖNIG, W. Über Kalt- und Warmluftinseln. Zeitschr. f. Meteor. 1
1947. S. 128 - 130.
- Über die Niederschläge der Kaltluftinseln. Zeitschr.
f. Meteor. 3, 1949. S. 321 - 325.

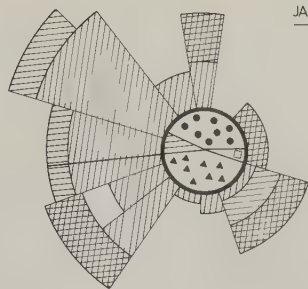
- KÖPPEN, W. Die Zugstraßen der barometrischen Minima in Europa und auf dem nordatlantischen Ozean und ihr Einfluß auf Wind und Wetter bei uns. Mitt. Geogr. Gesellsch. Hamburg, 1880/81. S. 76 - 97.
- . Erläuterungen zur Karte der Häufigkeit und der mittleren Zugstraßen barometrischer Minima zwischen Felsengebirge und Ural. Zeitschr. d. Österr. Gesellsch. f. Meteor. 17, 1882. S. 257 - 267.
- . Wind und Wetter in europäischen Gewässern. Berlin, 1917, 53 S.
- KREYSZIG, E. Statistische Methoden und ihre Anwendungen. Göttingen, 1965. 422 S.
- KRUHL, H. Beitrag zur Bildung von Kaltlufttropfen. Zeitschr. f. Meteor. 2, 1948. S. 13 - 17.
- . Induzierte Zyklognese. Ann. d. Meteor. 3, 1950. S. 136 - 148.
- . Trog, umgebogene Okklusion, sekundäre Kaltfront. Ann. d. Meteor. 6, 1955. S. 321 - 341 und 7, 1957. S. 353 - 373.
- . Die Sturmflutwetterlage vom 13./14. Febr. 1965. Wetterkarte d. Seewetteramtes Hamburg, Nr. 125 - 128, 1965.
- KÜHN, U. Die kalten Höhenzyklonen der Nordhalbkugel. Gerlands Beitr. Geophys. Bd. 65, 1956. S. 246 - 262.
- LAUTENSACH, H. Klimakunde als Zweig länderkundlicher Forschung. Geogr. Zeitschr. 46, 1940. S. 393 - 408.
- LILJEQUIST, G.H. Meteorologi. Stockholm, 1962. 438 S.
- . Klimatologie. Stockholm, 1970. 527 S.
- LOOMIS, E. Results derived from an examination of the United States Weather Maps for 1872 and 1873. Amer. Journ. of Science and Arts 3, Ser. 8, Nr. 43, 1874. S. 1 - 15.
- MACHT, H.G. Skagerrak-Zyklonen. Veröff. Geophys. Inst. Leipzig 9, 2. Serie, 1937. S. 103 - 218.
- und H. MARKGRAF. Zyklogenetische Gebiete auf dem Nordatlantischen Ozean. Ann. d. Meteor. 7, 1955/56. S. 310 - 321.
- MALBERG, H. Der Einfluß der Gebirge auf die Luftdruckverteilung am Erdboden. Meteor. Abh. FU Berlin. Bd. LXXI, Heft 2, 1967. 72 S.
- MARSAL, D. Statistische Methoden für Erdwissenschaftler. Stuttgart, 1967. 152 S.

- MAEDER, H. Zur Frage der Abgrenzung des Wirkungsbereiches einer Wetterlage. Zeitschr. f. Meteor. 5, 1951, S. 268 - 273.
- . Die Regenwetterlagen an der südlichen Ostsee. Diss. Greifswald, 1952. 151 S.
- . Klimatologische Untersuchungen über das Verhalten der Westwetterlagen im Raum der südlichen Ostsee und im norddeutschen Flachland. Zeitschr. f. Meteor. 6, 1952. S. 291 - 303.
- . Das Verhalten der Nordwest- und Nordlagen im Raum der südlichen Ostsee und des angrenzenden Flachlandes klimatologisch betrachtet. Zeitschr. f. Meteor. 7, 1953 a. S. 48 - 57.
- . Tiefkern-, Vb-, zyklonale Ost- und Südostlagen im Raum der südlichen Ostsee und des angrenzenden Flachlandes in klimatologischer Betrachtung. Zeitschr. f. Meteor. 7, 1953 b. S. 65 - 73.
- . Die Hochdruckwetterlagen im Raum der südlichen Ostsee und des angrenzenden Flachlandes in klimatologischer Betrachtung. Zeitschr. f. Meteor. 7, 1953 c. S. 129 - 146.
- . Der Einfluß der Land-See-Verteilung in Mitteleuropa auf das Verhalten von Tiefdruckgebieten verschiedener Typen. Zeitschr. f. Meteor. 8, 1954. S. 161 - 173.
- MÄRZ, E. Das Aprilwetter und seine Schauererien. Diss. Leipzig, 1936, 69 S.
- MEYER, H.K. Aufbau und Bewegung eines Kaltlufttropfens in Nordrußland. Meteor. Rundsch. 2, 1949. S. 208 - 217.
- . Flug durch einen Kaltlufttropfen über See. Meteor. Rundsch. 3, 1950 a. S. 108 - 111.
- . Flug durch ein kaltes Tief über See. Meteor. Rundsch. 3, 1950 b. S. 173 - 174.
- . Der Einfluß des vertikalen Impulsaustausches auf synoptische Druck- und Temperaturgebilde. Ber. d. Dt. Wetterd. Nr. 2, 1953. 27 S.
- . Über das Verhalten spezieller Kaltlufttropfen. Meteor. Abh. FU Berlin, 2, Heft 3, 1954. S. 91 - 98.
- MILDNER, P. Über den Zusammenhang zwischen Polarfront in den höheren Schichten der Troposphäre und der Entwicklung und Bewegung der Bodendruckgebilde. Inst. f. Meteor. u. Geophys. d. FU Berlin. Meteor. Abh. II, 3, 1954. S. 105 - 116.

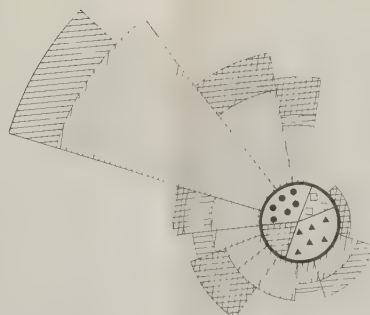
- MITTENECKER, E. Planung und statistische Auswertung von Experimenten. Wien, 1966. 168 S.
- MOESE, O. und G. SCHINZE. Zur Analyse von Neubildungen. Ann. Hydr. u. mar. Meteor. 57, 1929. S. 76 - 81.
- MÜLLER-ANNEN, H. Zur Prognose der Zugbahnen von Tiefdruckgebieten. 1. Teil: Zugbahnen und Geschwindigkeit der Tiefdruckgebiete. Ann. d. Meteor. 3, 1950. S. 341 - 351.
2. Teil: Zugbahnen und Druckänderungsgebiete und synoptische Erklärungen. Ann. d. Meteor. 5, 1952. S. 161 - 168.
- NEHLS, E. Das Klima des Ostseegebietes. Jahrb. d. Pommersch. Gesellsch. 51/52, 1933/34. S. 4 - 90.
- PAFFEN, K.H. Maritime Geographie. Erdkunde 1964. S. 39 - 62.
- PALMÉN, E. Ein Fall einer Regeneration einer sterbenden Depression. Meteor. Zeitschr. 46, 1929. S. 66 - 69.
- , Origin and structure of high-level cyclones south of the maximum Westerlies. Tellus 1, 1949. S. 22 - 31.
- und C.W. NEWTON. On the Three Dimensional Motions in an Outbreak of Polar Air. Journ. of Meteor. Vol. 8, 1951. S. 24 - 39.
- PELTONEN, T. A case study of an intense upper cyclone over eastern and northern Europe in November 1959. Geophysica 8, Nr. 3. Helsinki, 1963. S. 225 - 251.
- PEPPLER, W. Zur Skagerrak-Randzyklone. Das Wetter, Bd. XLIV, 1927. S. 187 - 189.
- PETTERSEN, S. Weather Analysis and Forecasting. New York und London, 1940. 503 S.
- , Weather Analysis and Forecasting. 2. ed. Vol. II. Weather and Weather Systems. New York, Toronto und London, 1956. 266 S.
- , D.L. BRADFURY und K. PEDERSEN. The Norwegian Cyclone Models in Relation to Heat and Cold Sources. Geofys. Publ. Vol. XXIV, Nr. 9. Oslo, 1962. S. 243 - 280.
- RAETJEN, P. Hydronamische Betrachtungen zu Scherhags Höhenzyklonen. Ann. d. Hydr. u. mar. Meteor. 65, 1947 a. S. 38 - 40.
- , 50 Jahre Zyklonentheorie und die gegenwärtige Entwicklung. Meteor. Zeitschr. 54, 1937 b, S. 393 - 405.
- REINEL, H. Die Zugbahnen der Hochdruckgebiete über Europa als klimatologisches Problem. Mitt. Fränk. Geogr. Gesellsch. 6, Erlangen, 1960. S. 1 - 73.

- REX, D.F. Blocking action in the middle troposphere and its effect upon regional climate. Tellus 2, 1950. S. 196 - 211 und 275 - 301.
- . The effect of Atlantic blocking action upon European climate. Tellus 3, 1951. S. 100 - 112.
- RICHTER, G. Singularitäten der Zyklonenfrequenz in einzelnen $5^{\circ}/10^{\circ}$ -Feldern. Veröff. d. Geophys. Inst. Leipzig 9, 2. Serie, 1938. S. 273 - 322.
- ROEDIGER, G. Irrfahrten eines kleinen Tiefs in einem großen Hoch. Wetterkarte d. Seewetteramtes Hamburg, Jg. 12, Nr. 23 und 24, 1964.
- ROSCHKOTT, A. Fronten im Gebirge. Meteor. Zeitschr. 48, 1931. S. 486 - 487.
- ROSSI, V. On the effect of the Scandinavian mountains on the precipitation fronts approaching from the sea. Fennia 70, 4, 1948. 23 S.
- . Land- und Seewind an den Finnischen Küsten. Finn. Meteor. Off. Contr. 41. Helsinki, 1957. 17 S.
- SCHÜLLER, A. Die Zirkulation im Nordatlantischen Ozean und den anliegenden Teilen der Kontinente, dargestellt durch Häufigkeitswerte der Zyklonen. Ann. Hydr. u. mar. Meteor. 52, 1924. S. 1 - 14.
- SCHERHAG, R. Die Entstehung des Ostseeorkans vom 8. und 9. Juli 1931. Ann. Hydr. u. mar. Meteor. 1934. S. 152 - 162.
- . Die Entstehung der Vb-Depressionen. Ann. Hydr. u. mar. Meteor. 64, 1936. II. Köppenheft. S. 64 - 74.
- . Ein Grenzfall atmosphärischer Steuerung: Die Bodenisobaren steuern ein Höhentief. Ann. Hydr. u. mar. Meteor. 65, 1937. S. 27 - 38.
- . Neue Methoden der Wetteranalyse und Wetterprognose. Berlin, 1948. 424 S.
- . Frontenlose Zyklonen der gemäßigten Breiten. in: LINKE, F. und F. BAUR. (Hrsg). Meteor. Taschenbuch, I. Bd. 1962². 806 S., S. 28 - 29.
- SCHINZE, G. und R. SIEGEL. Die luftmassenmäßige Arbeitsweise. Wiss. Abh. d. Reichsamts f. Wetterd. Sonderbd. Leipzig, 1943. Textbd. 99 S. Figbd. 167 S.
- SCHMIDT, G. Zyklonen auf ungewöhnlichen Zugbahnen. Ann. Hydr. u. mar. Meteor. 67, 1939. S. 516 - 523.

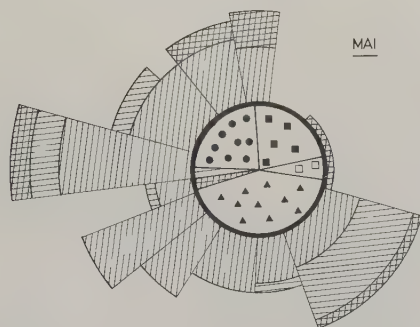
- SCHOENWÄLDER, H. Die Zyklonen der nördlichen Halbkugel. Diss. FU Berlin, 1953. (ungedruckt)
- SCHRÖDER, R. Die Regeneration einer Zyklone über Nord- und Ostsee. Veröff. Geophys. Inst. Leipzig. II. Serie, Bd. 4, H. 2, 1929. S. 50 - 116.
- SCHWEDTFEGER, W. Untersuchungen über den Aufbau von Fronten und Kaltlufttropfen. Ber. d. Dt. Wetterd. US-Zone Nr. 3, 1948. 35 S.
- SIMILÄ, A. Über Gewitterbildung und Gewittervorhersage besonders in Skandinavien. Mitt. Meteor. Zentr. Anst. Nr. 38. Helsinki, 1955. 67 S.
- SOLANTIE, R. The influence of the Baltic Sea and the Gulf of Bothnia on the Weather and Climate of Northern Europe, especially Finland, in Autumn and Winter. Finn. Meteor. Inst. Contr. Nr. 70, Helsinki, 1968. 28 S.
- WALLEN, A. Climate of Sweden. States Meteor. Hydr. Anst. Stockholm, 1930. 65 S.
- WARMBT, W. Beiträge zur Häufigkeitsklimatologie des Ostseeraumes. Veröff. Geophys. Inst. Leipzig 14, 2, 1941. S. 49 - 143.
- WEICKMANN, L. Häufigkeitsverteilung und Zugbahnen von Depressionen im mittleren Osten. Meteor. Rundsch. 13, 1960. S. 33 - 38.
- WEIGHTMAN, R.H. Average monthly tracks by types of lows in the United States. U.S. Weather Bur., Washington, 1945. 2 S.
- WEIMANN, W.U. Die Kaltlufttropfen zwischen Felsengebirge und Ural. Klimatologische und synoptische Untersuchungen für den fünfjährigen Zeitraum März 1951 bis Februar 1956. Meteor. Abh. FU Berlin, VI, 3, 1958. 40 S.
- WOICK, H. Die Entstehung der Genua-Zyklone und einfache graphische Methoden zu ihrer Vorhersage. Inst. f. Theoret. Meteor. Berlin, 1966. 52 S.



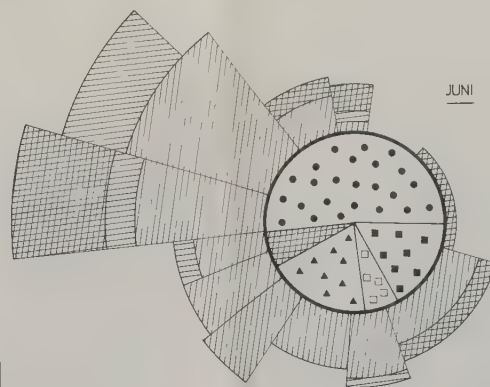
JANUAR



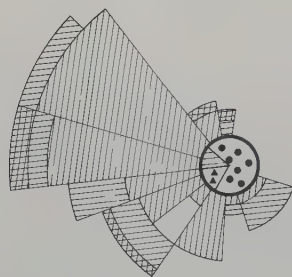
FEBRUAR



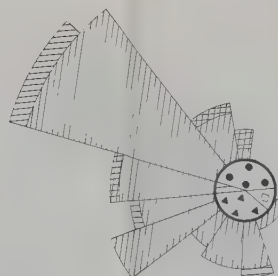
MAI



JUNI



SEPTEMBER

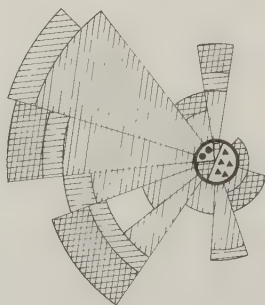


OKTOBER

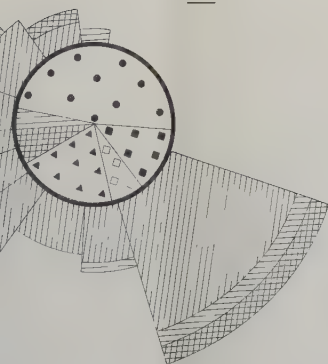
MÄRZ



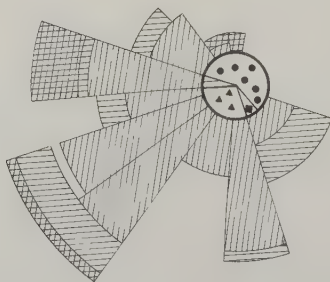
APRIL



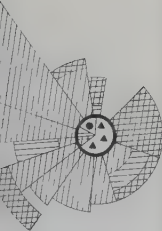
JULI



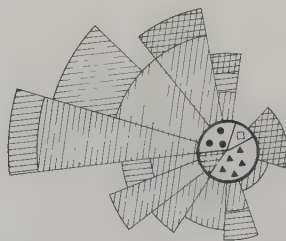
AUGUST



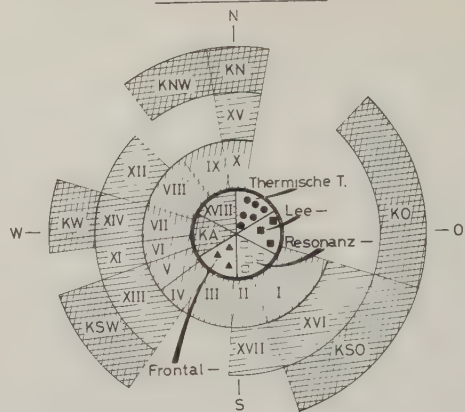
NOVEMBER



DEZEMBER



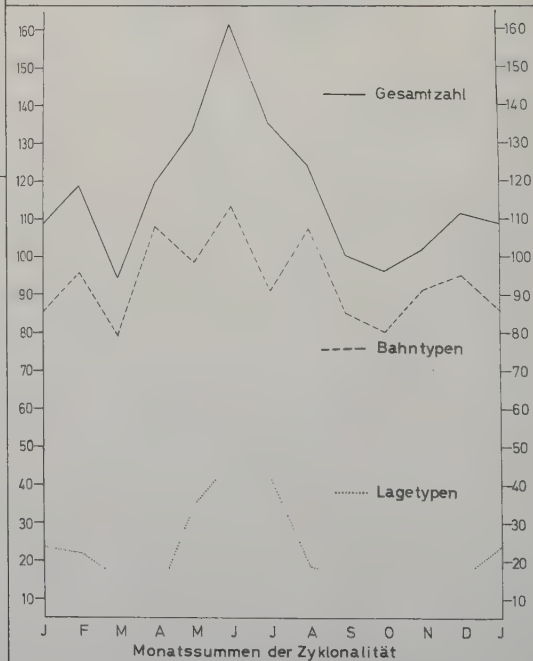
Zeichenerklärung



Schenkellänge der äußeren Kreissektoren: | — | 4 Vorkommen

Radiuslänge des inneren Kreises : | — | 20 Vorkommen

Der Jahresgang der Zyklonalität im Ostseeraum



LEBENS LAUF

Am 19. Oktober 1941 wurde ich als zweites Kind des Justizsekretärs Reinhard Lükenga und seiner Ehefrau Ella, geb. John in Oldenburg (Oldbg.) geboren. Von 1948 bis 1952 besuchte ich die ev. Volksschule in Oldenburg-Osternburg, von der ich im Frühjahr 1952 auf die Hindenburgschule, ein neusprachliches und math.-naturwissenschaftliches Gymnasium, überwechselte. An dieser Schule legte ich im Februar 1962 die Reifeprüfung ab. Im April 1962 wurde ich zur Bundeswehr eingezogen, die ich nach zweijähriger Dienstzeit als Reserveoffizier wieder verließ. Zum Sommersemester 1964 immatrikulierte ich mich an der Westfälischen Wilhelms-Universität in Münster und studierte dort bis zum Wintersemester 1970/71 die Fächer Geographie, Englisch, Philosophie und Pädagogik. Am 24. Mai 1971 bestand ich vor dem Wissenschaftlichen Prüfungsamt in Münster die 1. Philologische Staatsprüfung in den Fächern Erdkunde und Englisch.

Meine akademischen Lehrer an der Universität Münster waren die Professoren Planke, Plüthgen, Bornemann, v. Bredow, Döpp-Vorwald, Fabiar, Goerdts, Hahlweg, Hambloch, Harder, Hempel, Kaulbach, Lichtenstein, Mengüsoğlu, Mertner, Müller-Wille, Oelmüller, Pape, Schneider und Spevack.

